

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Є. П. Тимофєєв, О. М. Ляшенко

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Конспект лекцій

(для студентів денної і заочної форми навчання за напрямом підготовки
6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності
«Світлотехніка і джерела світла»)

ХАРКІВ
ХНАМГ
2009

Тимофєєв Є. П. Електричні апарати: конспект лекцій (для студентів денної і заочної форми навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Світлотехніка і джерела світла») / Є. П. Тимофєєв, О. М. Ляшенко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 81 с.

Укладачі: Є. П. Тимофєєв,
О. М. Ляшенко

Рецензент: проф. Л. А. Назаренко

Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла,
протокол № 10 від 6 травня 2008 р.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	4
Тема 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І ВИМОГИ ДО НИХ...	6
1.1. Загальне визначення.....	6
1.2. Класифікація електричних апаратів.....	6
1.3. Класифікація електричних установок.....	10
1.4. Вимоги до електричних апаратів.....	11
Тема 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ.....	13
2.1. Загальні відомості.....	13
2.2. Методи розрахунку електродинамічних зусиль (є.д.з.) і напрям їх дії.....	13
2.3. Сили між паралельними провідниками.....	16
2.4. Сили і моменти, що діють на перемичку.....	19
2.5. Сили, що діють у витку, котушці і між котушками.....	22
2.6. Електродинамічні зусилля в місці зміни перерізу провідника.....	24
2.7. Електродинамічні зусилля за наявності феромагнітних частин.....	25
2.8. Електродинамічні зусилля при змінному струмі. Механічний резонанс...	26
Тема 3. НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ.....	33
3.1. Загальні відомості.....	33
3.2. Активні втрати енергії в апаратах.....	33
3.3. Способи передачі тепла усередині нагрітих тіл і з їхньої поверхні.....	38
3.4. Сталій процес нагрівання.....	43
3.5. Нагрівання апаратів у перехідних режимах.....	45
3.6. Нагрівання апарата при короткому замиканні.....	52
3.7. Припустимі температури для різних частин апаратів при тривалій роботі і при короткому замиканні. Термічна стійкість апаратів.....	55
Тема 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ.....	57
4.1. Основні поняття.....	57
4.2. Перехідний опір контакту.....	58
4.3. Температура контактної площадки.....	62
4.4. Основні конструкції контактів.....	64
4.5. Параметри контактних конструкцій.....	70
4.6. Знос контактів.....	70
4.7. Знос контактів при розмиканні.....	72
4.8. Знос контактів при замиканні.....	73
4.9. Робота контактних систем в умовах короткого замикання.....	76
4.10. Електродинамічні сили в контактах і способи їх компенсації.....	77
4.11. Матеріали для контактних з'єднань.....	79
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	81

ВСТУП

Підвищення рівня електрифікації виробництва й ефективності використання електричної енергії є одним з основних завдань розвитку країни. Електрична енергія, що виробляється на електричних станціях, повинна бути розподілена і доставлена споживачеві, де вона відповідним чином перетворюється і використовується в технологічному процесі. Електричні апарати є тими електротехнічними пристроями, що обслуговують (керують, захищають, контролюють, регулюють і т.п.) електроустановки на всіх етапах виробництва, розподілу й споживання електричної енергії.

На електричних станціях енергія виробляється при напругах 6 – 25 кВ. Одиничні потужності генераторів складають 25 – 500 МВт і в найближчому майбутньому перевершать 1000 МВт. Частина енергії споживається при напругах 6 – 10 кВ, основна ж частина її транспортується до споживачів при напругах 35 – 750 кВ через підвищувальні трансформаторні підстанції і лінії електропередачі. У споживачів електроенергія знову трансформується до напруги 6 – 10 кВ і 380 – 500 В, при якій споживаються більш половини всієї електроенергії.

Усі необхідні вмикання, вимикання, переключення на електричних станціях, на підстанціях, що підвищують і знижують, на ЛЕП, що відходять і приходять, і на розподільних пристроях виконуються високовольтними вимикачами. Вони також здійснюють захист усіх електричних установок від струмів короткого замикання, перевантажень та інших ненормальних режимів роботи. Команди на відповідні переключення і вимикання подаються автоматично різноманітними реле і датчиками, що контролюють задані параметри і при їхньому відхиленні подають відповідні команди на відновлення чи вимикання пошкодженого елемента (генератора, трансформатора, ділянки ЛЕП).

У сучасних електромережах струми короткого замикання досягають дуже великих величин, їхня руйнівна дія надзвичайно велика. Для їхнього обмеження застосовують струмообмежуючі реактори, які включають між окремими секціями шин і на початку ЛЕП, що відходять. При номінальних струмах спадання напруги на реакторах мале, при коротких замиканнях – велике. Тим самим реактори обмежують величину струмів короткого замикання і забезпечують підтримку щодо високої залишкової напруги на генераторних шинах.

Для огляду, проведення ремонтних та інших робіт ділянки й елементи електротехнічних пристроїв мають бути відключені (вони повинні бути знеструмлені, і з них повинна бути знята напруга). Для забезпечення безпеки робіт має бути створений видимий розрив. Для цього застосовують роз'єднувачі. Їхнє розмикання допускається тільки після вимикання ділянки вимикачем.

Керування параметрами електротехнічних установок, їхній контроль, вимір і регулювання повинні здійснюватися при низькій напрузі, що

забезпечує необхідну безпеку роботи обслуговуючого персоналу. Вимірювальні трансформатори напруги і струму трансформують високі напруги і струми до деяких стандартних величин і забезпечують ізоляцію від високої напруги.

У низьковольтних розподільних пристроях вмикання і вимикання відхідних ліній і їхній захист від струмів короткого замикання, перевантажень, зниження напруги та інших ненормальних режимів здійснюють низьковольтними автоматичними вимикачами. Вони також застосовуються для захисту генераторів і різних електроприводів. Окремі електротехнічні установки (електроприводи, генератори) можуть підключатися через рубильники (виконують роль роз'єднувачів) і плавкі запобіжники. Останні здійснюють захист від коротких замикань і перевантажень за рахунок перегорання плавкої вставки, обтічної струмом установки.

Основними силовими апаратами керування електроприводами є контактори. З їхньою допомогою виконують усі вмикання, вимикання і переключення в силових низьковольтних колах з великою частотою цих операцій. Дистанційне керування контакторами здійснюється різними командоапаратами (кнопками, ключами, командоконтролерами і т.д.).

Автоматичне керування здійснюється різними реле. За допомогою відповідних реле, регуляторів і виконавчих елементів забезпечується повна автоматизація установок з виробництва, розподілу й споживання електроенергії.

Широко розповсюджені безконтактні елементи автоматики на базі напівпровідникової техніки. Вони дозволяють підвищити швидкодію, надійність і термін служби систем керування і регулювання.

Наростаючі темпи електрифікації країни вимагають не тільки збільшення кількості апаратів, але головним чином створення більш сучасних апаратів, підвищення рівнів їхніх напруг і струмів, зменшення ваги і габаритів, підвищення швидкодії, надійності й терміну служби. Така робота може проводитися тільки на базі досить чітких уявлень про фізику явищ, що протікають в електричних апаратах, і вміння застосовувати закони електротехніки при їхньому проектуванні [1-5, 9].

Тема 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І ВИМОГИ ДО НИХ

1.1. ЗАГАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ

Електричний апарат — це електротехнічний пристрій, що використовується для включення і відключення електричних ланцюгів, контролю, виміру, захисту, керування і регулювання установок, призначених для передачі, перетворення, розподілу й споживання електроенергії

Поняття «електричний апарат» дуже широке, тому що в нього входять різні побутові й промислові *пристрої* і *установки*.

У цих лекціях розглядаються основи теорії, принципи дії, конструкції і експлуатаційні характеристики апаратів, що застосовуються в електричних системах, у схемах електропостачання промислових підприємств і автоматизації виробничих процесів.

Електротехнічний пристрій – це промисловий виріб, призначений для виконання певної функції при вирішенні комплексного завдання: виробництва, розподілу, контролю, перетворення і використання електричної енергії.

Електрична установка – сукупність машин, апаратів, ліній і допоміжного устаткування (разом зі спорудами і приміщеннями, в який вони встановлені), призначені для виробництва, трансформації, передачі, розподілу електроенергії чи перетворення електроенергії в інший вид енергії.

1.2. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Велика кількість різновидів апаратів і виконуваних ними функцій, а також сполучення в одному апараті декількох функцій не дозволяє строго класифікувати їх за однією ознакою. Тому розрізняють такі класифікації:

- I. Класифікація за **призначенням**
- II. Класифікація за **напругою**
- III. Класифікація за **родом струму**
- IV. Класифікація за **типом захисту від попадання в електричні апарати сторонніх тіл і захисту персоналу від дотику зі струмоведучими й рухомими частинами, а також від попадання вологи.**
- V. Класифікація за **роботою у певних кліматичних умовах і за категорією розміщення.**
- VI. Класифікація за **областю використання; за принципом, що використовується в апараті, конструктивним особливостям і ін.**

I. Основною є класифікація за призначенням.

Залежно від призначення апарати можна розділити на такі великі групи.

1. **Комутаційні** апарати розподільних пристроїв. Ці апарати служать для вмикання і вимикання електричних кіл. До них відносяться *рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, вимикачі високої напруги, роз'єднувачі, від'єднувачі, короткозамикачі, автоматичні вимикачі,*

запобіжники. Характерним для цієї групи є відносно рідке їхнє вмикання і вимикання, хоча можуть бути випадки, коли апарат досить часто виконує такі операції (наприклад, вимикач високої напруги, що живить електричні печі)

2. **Обмежуючі** апарати. Ці апарати призначені для обмеження струмів короткого замикання (*реактори*) і перенапруги (*розрядники*). Режим роботи короткого замикання і перенапруги є нечастими, тому ці апарати мало зазнають великих перевантажень.

3. **Пускорегулюючі** апарати, призначені для пуску, регулювання частоти обертання, напруги і струму електричних машин або для пуску й регулювання будь-якого іншого споживача електричної енергії. До цієї групи відносяться *контролери, командоконтролери, контактори, пускачі, резистори і реостати*. Для цієї групи характерні часті вмикання і вимикання. У сучасних приводах кількість вмикань і вимикань за годину досягає 3600.

4. **Контролюючі** апарати. Основною функцією цих апаратів є контроль заданих електричних чи неелектричних параметрів. До цієї групи відносяться *реле і датчики*. Якщо при повільній зміні вхідної (контрольованої) величини вихідний сигнал апарата змінюється стрибком, то ми маємо справу з реле. Вихідний сигнал звичайно впливає на схему автоматики. Датчик перетворює безперервну зміну вхідної величини на зміну якої-небудь електричної величини, що є вихідною. Датчики можуть контролювати як електричні, так і неелектричні величини. Датчики роблять повільне перетворення величин, хоча можлива і стрибкоподібна зміна вихідного сигналу при повільній зміні вхідного (реле-датчики).

5. **Апарати для вимірів**. Ці апарати ізолюють кола первинної комутації (головного струму) від кіл вимірювальних і захисних приладів. Вони перетворюють вимірювану величину до стандартного значення, зручного для вимірювань. До них відносяться *трансформатори струму, трансформатори напруги, конденсаторні розподільники напруги*.

6. **Регулюючі** апарати призначені для регулювання заданого параметра за наперед заданим законом. Зокрема, *регулятори* призначені для підтримки на незмінному рівні напруги, струму, температури, частоти обертання та інших величин.

У даному курсі електричні регулятори не розглядаються, тому що принцип їхньої дії і характеристики тісно пов'язані з теорією автоматичного регулювання, що тут не викладається.

II. Класифікація за напругою:

- 1) ЕА низької напруги до 1000 В (660 В включно)
- 2) ЕА високої напруги (більше 1000 В).

III. Класифікація за родом струму :

- 1) ЕА постійного струму.
- 2) ЕА змінного струму промислової частоти.
- 3) ЕА змінного струму підвищеної частоти.

IV. Класифікація за родом захисту від попадання в електричні апарати сторонніх тіл і захисту персоналу від дотику зі струмоведучими і рухливими частинами, а також від попадання вологи.

Для захисту персоналу від стикання зі струмоведучими чи рухомими частинами і захисту апарата від попадання в нього сторонніх тіл установлюють спеціальні оболонки.

Захисні властивості оболонки позначаються буквами IP і двома цифрами. Перша цифра позначає ступінь захисту від дотику персоналу до небезпечних деталей апарата, друга характеризує захист від попадання рідини всередину апарата.

Ступінь захисту виражається умовними буквено-цифровими позначеннями, що прийняті в усьому світі.

IP – міжнародний ступінь захисту,

XX – захист від влучення твердих тіл і вологи.

I P X X

Захист від пилу

Захист від вологи

1) Захист від пилу (перший знак **X):**

Якщо перша цифра 0 – то захист відсутній.

Якщо 1, то **передбачений** захист від навмисного доступу, від попадання великих тіл діаметром не менше 52,5 мм $\varnothing \geq 52,5$ мм (долоня).

Якщо 2, то **передбачений** захист від попадання сторонніх тіл $\varnothing \geq 12,5$ мм і довжиною 80 мм (палець).

Якщо 3, то **передбачений** захист від навмисного доступу тіла діаметром $\varnothing \geq 2,5$ мм (захист від інструмента).

Якщо 4, то **передбачений** захист від навмисного доступу тіла діаметром $\varnothing \geq 0,1$ мм (дріт).

Якщо 5, то **передбачений** повний захист персоналу, захист від попадання пилу.

Якщо 6, то **передбачений** повний захист персоналу, захист від попадання пилу.

2) Захист від вологи (другий знак **X):**

Якщо друга цифра 0 – то захист відсутній.

Якщо 1, то **передбачений** захист від крапель сконденсованої води.

Якщо 2, то **передбачений** захист від крапель.

Якщо 3, то **передбачений** захист від дощу (від крапель, що падають вертикально під кутом у 60°).

Якщо 4, то **передбачений** захист від бризів будь-якого напрямку.

Якщо 5, то **передбачений** захист від струменів води.

Якщо 6, то **передбачений** захист від впливів води, характерних для палуби корабля (хвилі).

Якщо 7, то **передбачений** захист від занурення у воду.

Якщо 8, то **передбачений** захист від тривалого занурення у воду під тиском (глибоководний електричний апарат).

Наприклад:

IP00 – відкрите виконання

IP20 – захищене виконання

IP44 – бризозахисне виконання

IP54 – пилозахисне виконання

IP66 – морське виконання

IP67 – герметичне виконання

V. Класифікація за роботою у певних кліматичних умовах і за категорією розміщення. За ДСТ 15150-69.

Установлено **п'ять категорій** за розміщенням електричних апаратів:

- 1) Електричні апарати, призначені для роботи на відкритому повітрі.
- 2) Електричні апарати, призначені для роботи на відкритому повітрі під навісом, у наметі, механічному кожусі.
- 3) Електричні апарати, призначені для роботи в закритому приміщенні без опалення (трансформаторні підстанції).
- 4) Електричні апарати, призначені для роботи в закритих приміщеннях з опаленням.
- 5) Електричні апарати, призначені для роботи в приміщеннях з підвищеною вологістю або для роботи в ґрунті (шахти, підвали).

ДСТ 15543-70 конкретизує попередній ДСТ у частині класифікації електричних апаратів у певних кліматичних умовах, що характеризуються зміною в температурі і вологості повітря, а також межами їхньої зміни в часі у визначеній кліматичній зоні.

Установлено такі кліматичні зони:

	Російське	латинське
1) Зони помірного клімату	У	N
2) Зони помірного і холодного клімату	УХЛ	NF
3) Зони тропічно-вологого клімату	ТВ	TH
4) Зони тропічно-сухого клімату	ТС	TA
5) Зони тропічного клімату	Т	T
6) Для всіх кліматичних районів на суші і на морі	О	U

Приклад: Маркірування магнітного пускача: ПМА-6122У22Б. Судячи з У2 можна сказати, що: У - даний апарат призначений для роботи в країнах з помірним кліматом при значеннях температури від -40° до $+40^{\circ}$ при середньомісячній вологості повітря 80% при 20%; 2 - у приміщеннях, що мають вільний доступ зовнішнього повітря.

VI. Класифікація апаратів за принципом дії, родом струму, часом дії, конструктивним особливостям буде розглянута у лекціях, присвячених будові і характеристикам апаратів.

1.3. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

Кліматичні особливості роботи електричних апаратів треба співвідносити з категоріями електричних установок.

1. **Відкриті чи зовнішні електричні установки** – це електричні установки на відкритому повітрі захищені навісом і сітчастим загородженням.
2. **Закриті чи внутрішні електричні установки** – електричні установки, що знаходяться у закритому приміщенні.

Приміщення бувають:

- а) **сухі**, де відносна вологість не перевищує 60% при 20°C . Такі приміщення називаються нормальними при відсутності в них умов, характерних для приміщень жарких, курних, з хімічно небезпечним середовищем чи вибухонебезпечних;
- б) **вологі** приміщення, в яких пари і конденсована волога виділяється лише тимчасово з вологістю не більше 75%.
- в) **сирі** приміщення, в яких відносна вологість тривалий час перевищує 75%;
- г) **особливо сирі** приміщення, де вологість близька до 100%, стеля і стіни вкриті вологою;
- д) **жаркі** приміщення, де температура тривалий час перевищує $+30^{\circ}$;
- е) **курні** приміщення, де пил, що виділяється, попадає усередину електричних апаратів і електричних машин. Вони підрозділяються на :
 - із провідним пилом;
 - з непровідним пилом.
- ж) *приміщення з хімічно активним середовищем*, що містять пари або відкладення, що утворилися, що руйнують ізоляцію і струмозахисні частини.

Залежно від сукупності цих факторів приміщення підрозділяються на: *приміщення з підвищеною безпекою і особливо небезпечні приміщення.*

Приміщення з підвищеною безпекою – це приміщення, де наявні такі умови:

- а) вогкість і провідний пил,
- б) струмопровідна підлога,
- в) висока температура,
- г) можливість одночасного зіткнення з металевими корпусами і з заземленими металевими конструкціями.

Особливо небезпечні приміщення – це такі, де наявні такі умови:

- а) особлива вогкість.
- б) хімічно активне середовище.
- в) одночасна наявність двох і більш умов з підвищеною безпекою.

1.4. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Перш ніж перейти до розгляду вимог до електричних апаратів, визначимо режими роботи електротехнічних пристроїв. Можна виділити:

Номинальний режим роботи – це такий режим, коли елемент електричного кола працює при значеннях струму, напруги, потужності, зазначених у технічному паспорті, що відповідає найвигіднішим умовам роботи з погляду економічності й надійності (довговічності).

Нормальний режим роботи – режим, коли апарат експлуатується при параметрах режиму, що незначно відрізняються від номінального.

Аварійний режим роботи – це такий режим, коли параметри струму, напруги, потужності перевищують номінальний у два й більше рази. У цьому випадку об'єкт повинен бути відключений.

Тепер перейдемо до вимог до електричних апаратів (ЕА).

Вимоги до електричних апаратів дуже різноманітні і залежать від:

- а) призначення апарата;
- б) умов експлуатації;
- в) необхідної надійності електричних апаратів.

Для всіх апаратів існують *загальні вимоги*, яким вони повинні задовольняти.

1. а) Апарати, включені в коло послідовно (вимикачі, автомати, контактори), обтікаються струмом цього кола. При номінальному режимі температура струмоведучих елементів апарата не повинна перевищувати значень, рекомендованих відповідними стандартами.
- б) При короткому замиканні струмоведуче коло апарата зазнає значних термічних і динамічних перевантажень, які викликані великим струмом. Ці перевантаження не повинні викликати залишкових явищ, що заважають подальшій нормальній роботі апарата.
2. а) Апарати, призначені для частого вмикання і вимикання номінального струму навантаження, повинні мати високу механічну й електричну зносостійкість.
- б) Апарати, які за умовами роботи можуть вмикати і вимикати струми короткого замикання, повинні мати контакти, розраховані на цей режим роботи
3. Ізоляція електричних апаратів повинна розраховуватися з умов можливих перевантажень, які можуть бути при роботі установки, з деяким запасом, що враховує погіршення властивостей ізоляції при експлуатації внаслідок осадження пилу, бруду й вологи.
4. До кожного апарата висувається ряд специфічних вимог, зумовлених його

призначенням. Так, вимикач високої напруги повинен вимикати струм короткого замикання за малий час (0,04—0,06 с). Трансформатор струму повинен давати струмову й кутову похибки, що не перевищують певного значення. Контакттор повинен мати високу механічну й електричну зносостійкість.

5. У зв'язку із широкою автоматизацією виробничих процесів, застосуванням складних схем автоматики збільшується кількість апаратів, які беруть участь у роботі, і, отже, підвищуються вимоги до надійності апаратів.

Надійність – основний якісний показник для основних електричних апаратів, обумовлений надійністю вузлів. Включає три поняття:

- 1) безвідмовність – властивість безупинна зберігати працездатність;
- 2) довговічність – властивість тривалий час зберігати працездатність – сума інтервалів часу безвідмовної роботи;
- 3) ремонтоздатність – здатність до відновлення працездатності.

Відмовлення – стан електричного апарата, коли одна чи група характеристик виходять за визначені межі й апарат утрачає працездатність.

6. Усі без винятку апарати повинні мати малу масу, вартість, габарити. На їх установку й обслуговування повинно витрачатися небагато часу. Апарати повинні мати конструкцію, що дозволяє широко впроваджувати автоматизацію виробничих процесів при їх виготовленні.

Тема 2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

2.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

При короткому замиканні в мережі через струмоведучу частину апарата можуть проходити струми, які в десятки разів перевищують номінальний. Ці струми, взаємодіючи з магнітним полем, створюють електродинамічні сили, які прагнуть деформувати як самі провідники, так і ізолятори, на яких вони кріпляться.

Електродинамічною стійкістю апарата називається його здатність протистояти силам, що виникають при проходженні струмів короткого замикання. Ця величина може виражатися або безпосередньо амплітудним значенням струму $i_{\text{дин}}$, при якому механічні напруги в деталях апарата не виходять за межі допустимих значень, або кратністю цього струму щодо амплітуди номінального струму:

$$k_{\text{дин}} = i_{\text{дин}} / \sqrt{2} I_n$$

Іноді динамічна стійкість оцінюється діючим значенням ударного струму за період після початку короткого замикання.

2.2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЗУСИЛЬ (Е.Д.З.) І НАПРЯМ ЇХ ДІЇ

а) **Методи розрахунку.** Для розрахунку Е.Д.З. використовують два методи.

У **першому** – сила розглядається як результат взаємодії провідника із струмом і магнітного поля.

Якщо елементарний провідник dl (м) зі струмом i (А) знаходиться в магнітному полі з індукцією B (Т), створюваного іншими провідниками (рис. 1, а), то сила dF (Н), що діє на цей елемент, така:

$$dF = idl \times B = iBdl \sin \beta$$

де i – струм;

β – кут між векторами елементу dl і індукції B , вимірюваний кутом повороту вектора dl до вектора B по найкоротшій відстані. За напрям dl береться напрям струму в елементі. Напрямок індукції B , створюваної іншим провідником, визначається за правилом буравчика, а напрям сили – за правилом лівої руки.

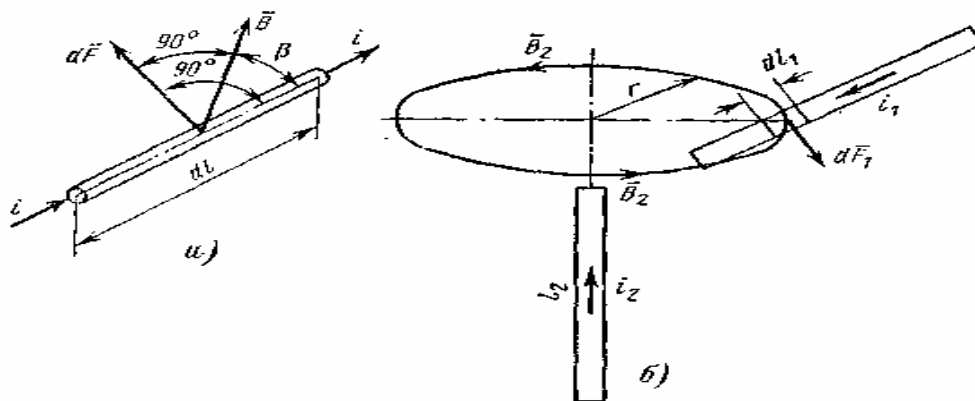


Рис.1 – Напряж Е.Д.З., що діє на елемент зі струмом

Для визначення повної сили, що діє на провідник завдовжки l , необхідно підсумувати сили, що діють на всі його елементи:

$$F = \int_0^l dF = B i \sin \beta dl$$

У разі будь-якого розташування провідників в одній площині $\beta = 90^\circ$ це рівняння спрощується:

$$F = \int_0^l B i dl$$

Описаний метод рекомендується застосовувати тоді, коли можна аналітично знайти індукцію у будь-якій точці провідника, для якого необхідно визначити силу. Індукцію визначають, використовуючи закон Біо-Савара-Лапласа .

Другий метод заснований на використанні енергетичного балансу системи провідників зі струмом . Якщо нехтувати електростатичною енергією системи і прийняти, що при деформації струмоведучих контурів або при їх переміщенні під дією Е.Д.З. струми у всіх контурах залишаються незмінними, то силу можна знайти за рівнянням

$$F = dW/dx$$

де W – електромагнітна енергія;

x – можливе переміщення у напрямі дії сили.

Таким чином, сила дорівнює похідній частинній від електромагнітної енергії даної системи по координаті, у напрямі якої діє сила. При розрахунку Е.Д.З., діючих при короткому замиканні, величини струмів у контурах можна вважати незмінними.

Електромагнітна енергія системи обумовлена як енергією магнітного поля кожного ізольованого контуру, так і енергією, що визначається магнітним зв'язком між контурами, і для двох взаємозв'язаних контурів дорівнює:

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$

де L_1 і L_2 – індуктивності контурів;
 i_1 і i_2 – струми, що протікають у них;
 M – взаємна індуктивність.

Перші два члени рівняння визначають енергію незалежних контурів, а третій член дає енергію, обумовлену їх магнітним зв'язком.

Рівняння дає можливість розрахувати як сили, що діють в ізольованому контурі, так і силу взаємодії контуру з усіма іншими.

Для визначення сил усередині одного незалежного контуру скористуємося рівнянням

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx}$$

При розрахунку сили взаємодії контурів ми вважаємо, що енергія змінюється тільки в результаті зміни взаємного розташування контурів. При цьому енергія, обумовлена власною індуктивністю, вважається незмінною. У даному разі сила взаємодії між контурами дорівнює:

$$F = \frac{dW}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM}{dx}$$

Енергетичний метод зручний, коли відома аналітична залежність індуктивності або взаємної індуктивності від геометричних розмірів.

б) **Напрямок дії Е. Д. 3.** Знайдемо напрям сили, що діє на елемент $d\mathbf{l}_1$ із струмом i_1 (рис.1, б). Лінія індукції \mathbf{B}_2 , що створюється струмом i_2 , є колом з радіусом r , що лежить у площині, перпендикулярній до \mathbf{l}_2 . Напрямок сили $d\mathbf{F}_1$ визначається за правилом лівої руки (показано на рис.1, б).

Для плоскої задачі, коли всі провідники лежать в одній площині, сумарна індукція, що діє на провідник, завжди перпендикулярна до цієї площини, а сила лежить у площині. Напрями Е.Д.3. для деяких випадків розташування провідників в одній площині показані на рис. 2.

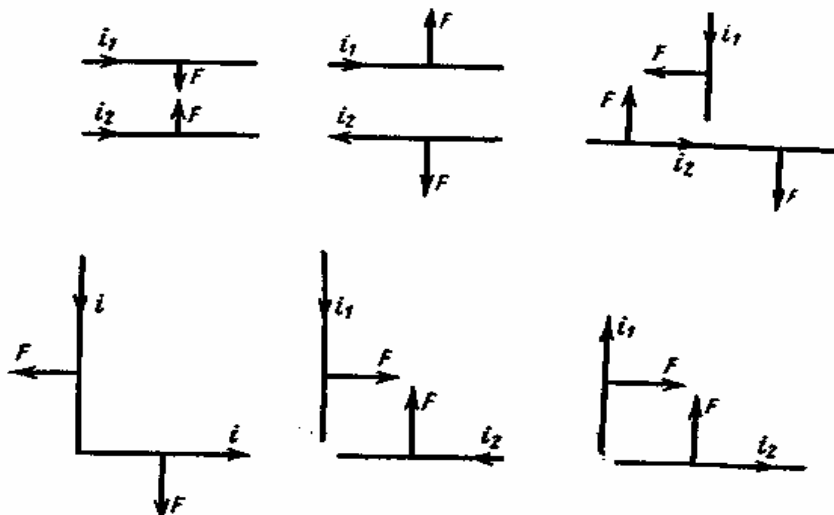


Рис. 2 – Напрями Е.Д.З. при різному розташуванні провідників

Напрямок дії сили може бути також визначений з наступного загального положення: сили, що діють в контурі із струмом, прагнуть змінити конфігурацію контуру так, щоб охоплюваний контуром магнітний потік збільшився.

Вельми зручним для визначення напрямку дії електродинамічної сили є метод, запропонований акад. У.Ф. Міткевічем, заснований на представленні бічного розпору і тяжіння магнітних ліній. Малюють і накладають одна на одну картини магнітних полів, що створюються струмом кожного з провідників. Завдяки бічному розпору магнітних силових ліній сила, що діє на провідник, направлена у бік, де поле ослаблене (рис. 3).

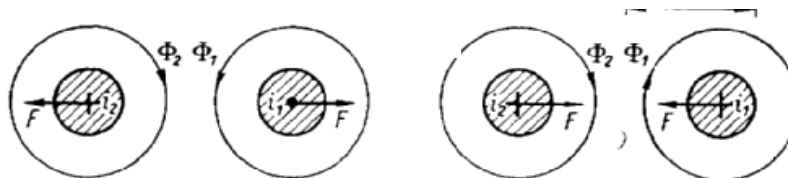


Рис.3 – До визначення електродинамічного зусилля між двома провідниками

2.3. СИЛИ МІЖ ПАРАЛЕЛЬНИМИ ПРОВІДНИКАМИ

Розглянемо спочатку завдання для нескінченно тонких провідників кінцевої довжини (рис. 4). У цьому випадку легко аналітично знайти індукцію в будь-якій точці простору. Тому для визначення сили скористаємося першим методом.

Згідно з законом Біо-Савара-Лапласа елементарна індукція від елемента струму $i_1 \, dy$ у місці розташування елемента dx дорівнює:

$$dB = d\mu_0 H = \frac{\mu_0 i_1 dy}{4\pi r^2} \sin \alpha$$

де μ_0 - абсолютна магнітна проникність повітря, що дорівнює $0,4 \pi 10^{-6}$ Г/м;
 α – кут між струмом i_1 і вектор \mathbf{r} від $d\mathbf{y}$ до $d\mathbf{x}$, що розглядається.

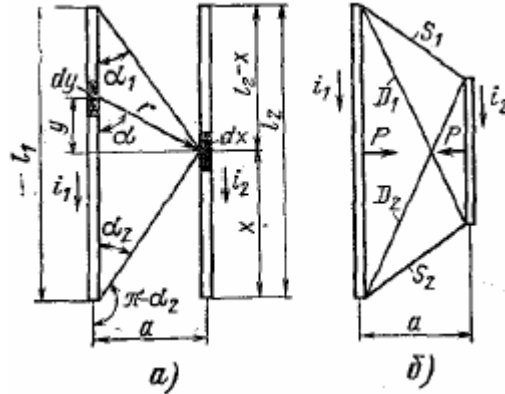


Рис. 4 – Електродинамічні зусилля між паралельними провідниками

Повна індукція від провідника l_1 у тій точці, де розташований елемент $d\mathbf{x}$, дорівнює:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_0^{l_1} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy$$

Перейдемо до нової змінної:

$$y = \frac{\alpha}{\tan \alpha}; \quad r = \frac{\alpha}{\sin \alpha}; \quad dy = -\frac{\alpha}{\sin \alpha} d\alpha.$$

Після підстановки y ; r і dy одержимо

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_{\pi-\alpha_2}^{\alpha_1} \left(-\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{\alpha}.$$

Сила взаємодії між провідником l_1 і елементом $d\mathbf{x}$

$$dF_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{\alpha} i_1 i_2 dx.$$

Змінною інтегрування тепер є x -координата на провіднику l_2 . Кути α_1 і α_2 для кожної точки x виражаються таким чином:

$$\cos \alpha_1 = \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + \alpha^2}}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + \alpha^2}},$$

тоді

$$F_x = \frac{10^{-7}}{\alpha} i_1 i_2 \int_0^{l_2} \left[\frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + \alpha^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + \alpha^2}} \right] dx.$$

Якщо $l_1 = l_2 = l$, то

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{\alpha} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{l} \right)^2} - \frac{\alpha}{l} \right], \text{Н.}$$

Добуток $\frac{2l}{\alpha} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{l} \right)^2} - \frac{\alpha}{l} \right]$ залежить тільки від розмірів провідників

і їх розташування. Назвемо його геометричним чинником. Тоді

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 k_r.$$

Якщо відстань між провідниками значно менша за їх довжину, тобто $a/l \ll 1$, то k_r можна прийняти рівним $2 l/a$ (випадок нескінченно довгих шин). При $a/l < 0,1$ розрахунок за формулою

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}$$

дає похибку не більше 5% (у бік збільшення). Для двох паралельних провідників різної довжини, розташованих з будь-яким зрушенням, Г.Б. Холявський одержав зручну для розрахунку формулу (рис. 4, б)

$$k_r = \frac{\sum D - \sum S}{a} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a},$$

де $\sum D$ – сума діагоналей трапеції, побудованої на взаємодіючих провідниках;

$\sum S$ – сума бічних сторін цієї трапеції;

a – відстань між провідниками.

При знаходженні електродинамічних сил ми вважали, що переріз провідників нескінченно малий і весь струм йде по їх геометричній осі. Насправді переріз провідників завжди скінченний. Можна показати [1-8], що для провідників круглого і трубчастого перерізів форма перерізу не впливає на електродинамічну силу. У цьому випадку при розрахунках можна

прийняти, що струм йде по геометричній осі. Слід зазначити, що поверхневий ефект у провідниках круглого перерізу не позначається на Е. Д. З., а ефект близькості, що зміщує осі струмів у провідниках, впливає, викликаючи збільшення сили при зустрічних струмах і зменшення при односпрямованих струмах.

Для шин прямокутного перерізу форма перерізу впливає на електродинамічну силу. У цьому разі можна користуватися попередніми рівняннями з урахуванням форми перерізу провідника:

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 k_r k_\phi.$$

Криві для коефіцієнта форми наведені на рис. 5.

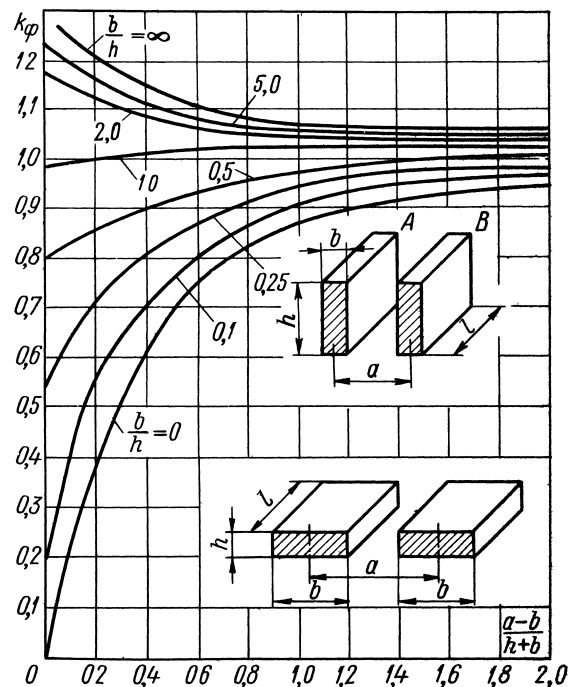


Рис. 5 – Криві, що враховують форму перерізу провідника

2.4. СИЛИ Й МОМЕНТИ, ЩО ДІЮТЬ НА ПЕРЕМИЧКУ

В електричних апаратах часто зустрічається розташування частин струмоведучого контуру під прямим кутом (рис. 6, а). Для спрощення завдання при розрахунку вважаємо, що струм тече по геометричній осі провідників і вертикальний провідник йде в нескінченність.

Сила, що діє на елемент перемички dx , дорівнює:

$$dF = iB_x dx.$$

Індукція B_x від напівнескінченного провідника в точці на відстані x від його осі дорівнює:

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{4\pi x}.$$

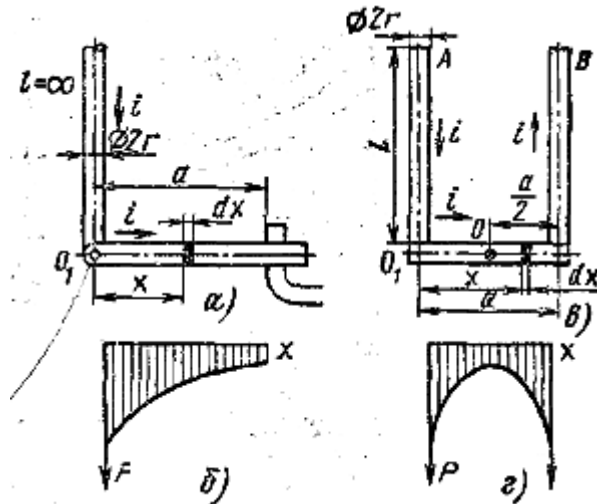


Рис. 6 – Електродинамічні зусилля між провідниками, розташованими під кутом

Указаний закон зміни індукції справедливий у всіх точках простору, за винятком $x < r$.

Сила на ділянці x дорівнює $F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \ln x/r$. Тоді повна сила F , що діє на перемичку на довжині від r до a , дорівнюватиме:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{a}{r} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}.$$

Якщо довжина вертикального провідника кінцева, то індукція насправді менша, ніж це впливає з рівняння, а реальна сила, що діє на перемичку, менше, ніж дає рівняння.

Розподіл сили уздовж перемички представлений на рис. 6, б. З віддаленням від осі вертикального провідника індукція зменшується, що веде до зменшення сили.

У масляних вимикачах та інших апаратах струмопровідний ланцюг може мати вигляд «петлі» (рис. 6, в). На перемичку в цьому разі діє сила як від правого, так і від лівого вертикального провідників, тобто сила буде удвічі більша за ту, яку одержуємо за формулою. Якщо «петля» виконана з провідників круглого перерізу, то силу можна знайти, скориставшись енергетичним методом.

Відомо, що індуктивність П-подібної петлі дорівнює:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right).$$

Одержуємо:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dl} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right) = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right), H.$$

Формула враховує і силу, що виникає в місці переходу струму з одного провідника в інший.

Якщо довжина l спільномірна з відстанню a , то розрахунок Е.Д.З. необхідно проводити за формулою, що враховує кінцеву довжину вертикального провідника :

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left[\ln \frac{2a}{r \left(1 + \sqrt{\left(\frac{a}{l} \right) + 1} \right)} + 0,25 \right], H.$$

Слід зазначити, що сили, які діють на вертикальні провідники і на горизонтальний провідник, в загальному випадку, коли довжини провідників різні, неоднакові.

При розрахунку електродинамічної стійкості необхідно визначати момент Е.Д.З. щодо точки обертання рухомого контакту або щодо точки кріплення. Розрахуємо вигинаючий момент, що створюється Е.Д.З. у точці О кріплення траверси до тяги (рис. 6, в). При цьому будемо вважати, що вертикальні провідники нескінченні і що струм проходить по їх геометричних осях.

Елементарний момент Н-м, у перетині, віддаленому на відстані x від лівого провідника, дорівнює:

$$\begin{aligned} dM &= dM_1 + dM_2 \\ dM_1 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i^2}{x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx = 10^{-7} \frac{i^2}{x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx, \\ dM_2 &= 10^{-7} \frac{i^2}{a-x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx. \\ M &= 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} \right). \end{aligned}$$

Окрім Е.Д.З., від лівого і правого провідників створюється вигинаючий момент за рахунок сили, що виникає в місці переходу струму. Повний момент щодо точки **О** дорівнює:

$$M_0 = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} + 0,25 \right).$$

2.5. СИЛИ, ЩО ДІЮТЬ У ВИТКУ, КОТУШЦІ Й МІЖ КОТУШКАМИ

а) **Розрахунок Е.Д.З. у витку.** Розглянемо розрахунок сили в круговому витку (рис. 7). Індуктивність **L** такого витка з точністю до 1% (за умови, що $r/R < 0,25$) виражається формулою

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right).$$

Оскільки відома аналітична залежність індуктивності від розмірів витка, при визначенні Е.Д.З. доцільно скористатися енергетичним методом. Сила, що діє у витку, направлена по радіусу; із зростанням радіусу зростає індуктивність, а отже, електромагнітна енергія провідника. Ця сила **F** дорівнює:

$$F_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR}.$$

З рівняння одержимо:

$$F_R = \frac{\mu_0}{2} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right).$$

Сила **F_R** прикладена до кола завдовжки $2\pi R$. При розрахунку електродинамічної стійкості необхідно знати силу **F_q**, що розриває виток.

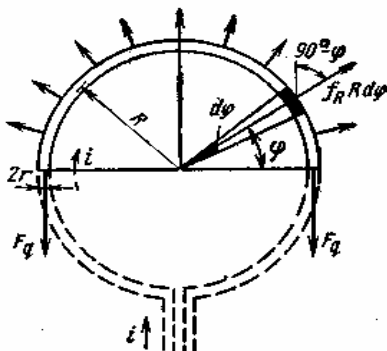


Рис. 7 – Електродинамічні зусилля в кільці

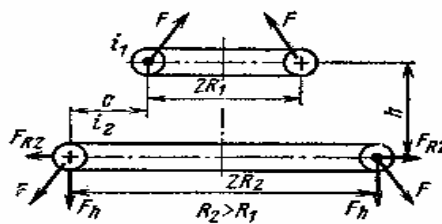


Рис. 8 – Електродинамічні зусилля між витками

Для визначення F_q розглянемо рівняння рівноваги напіввитка. Очевидно, що

$$F_q = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_R R d\varphi \sin \varphi,$$

де f_R - сила, що діє на одиницю довжини, дорівнює $F_R/2\pi R$

Після інтегрування одержимо:

$$F_q = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right).$$

Якщо круговий виток знаходиться в рівномірному магнітному полі, що створюється іншими провідниками, то, окрім внутрішніх сил, виникає додаткова сила в результаті взаємодії струму витка із зовнішнім полем.

б) **Електродинамічні сили в циліндровій котушці** направлені так, щоб зростало її потокозчеплення. Тому при проходженні струму в обмотці виникають сили, які прагнуть стиснути обмотку по висоті в товщині і збільшити середній діаметр.

Для розрахунку сил, що діють у різних точках котушки, визначають індукцію в цих точках і силу розраховують за допомогою рівняння .

в) **Сила взаємодії між витками і котушками.** Розглянемо силу взаємодії двох кругових витків (рис. 8). Якщо відстань між витками сумірна з їх діаметрами і останні мало відрізняються один від одного, то взаємна індуктивність, M , може бути виражена простою формулою

$$M = \mu_0 R_1 \left[\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + c^2}} - 2 \right],$$

$$c = R_2 - R_1.$$

Розглянемо силу, що діє на контур із струмом i_2

Вертикальна складова сили така

$$F_h = \frac{dW}{dh} = i_1 i_2 \frac{dM}{dh} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{R_1 h}{h^2 + c^2}.$$

Горизонтальна складова дорівнює:

$$F_{R_2} = \frac{dW}{dR_2} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_2}{dR_2} + i_1 i_2 \frac{dM}{dR_2}$$

У рівняннях треба враховувати напрями струмів i_1 і i_2 .

Перший доданок – сила, що виникає в контурі за рахунок струму i_2 , друге – в результаті дії витка із струмом i_1 . Залежності сил F_h і F_{R2} від відстані h показані на рис. 9.

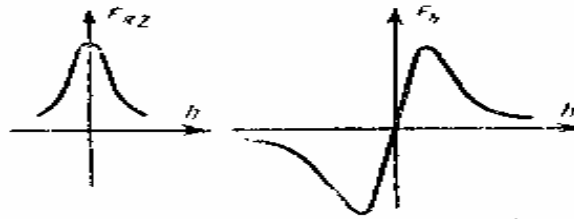


Рис. 9 – Залежності сил F_h і F_{R2} від h

2.6. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ В МІСЦІ ЗМІНИ ПЕРЕРІЗУ ПРОВІДНИКА

При зміні перерізу провідника лінії струму скривлюються, в результаті сила F , що діє на лінію струму, одержує подовжню F_2 і поперечну F_1 , складові. Подовжня складова прагне розірвати місце переходу уздовж осі провідника (рис.10) і направлена в бік більшого перерізу:

$$F_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

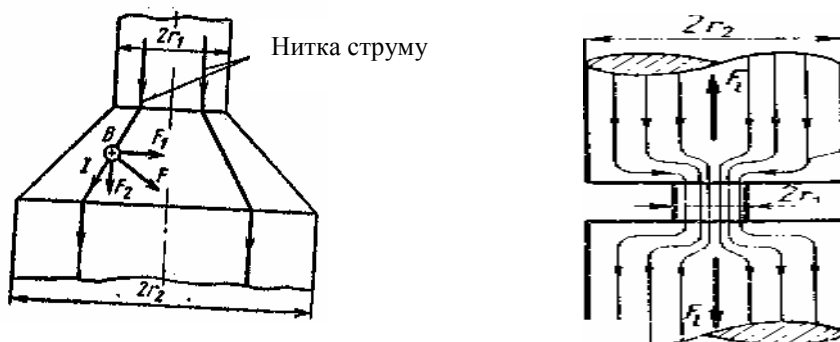


Рис. 10 – Електродинамічні зусилля в місці зміни перерізу провідника

Електродинамічна сила, що виникає при зміні перерізу, залежить тільки від відношення кінцевого і початкового радіусів і не залежить від форми переходу при осесиметричному провіднику. В електричному контакті під час переходу струму з одного контакту в інший відбувається викривлення ліній струму, аналогічне розглянутому. Для одноточечного контакту (рис.10) стикання контактів відбувається по площині дотику $\pi r^2 = \pi a^2$. коли вважати, що ця площа знаходиться в центрі циліндрових провідників, то сила, що діє на кожен напівконтакт, може бути розрахована за формулою

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r}{r_k} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r}{r_k},$$

де r – радіус циліндрового контакту;

r_k – радіус круглої площини дотику.

Для того, щоб контакт був стійким в динамічному відношенні, сила натиснення контактів F_k повинна бути більше сили відкиду.

2.7. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ ЗА НАЯВНОСТІ ФЕРОМАГНІТНИХ ЧАСТИН

Розглянемо провідник зі струмом поблизу феромагнітної стінки з нескінченною магнітною проникністю. При наближенні провідника до стінки магнітна провідність, а отже, і потік збільшуються, оскільки скорочується шлях потоку по повітрю. На провідник діє сила, що притягає його до стінки:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} l \frac{d\Phi}{dx}.$$

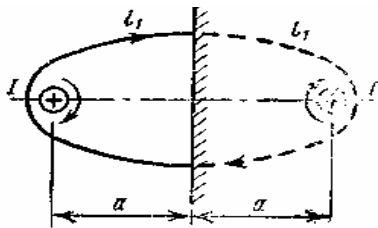


Рис. 11 – Електродинамічні зусилля між провідниками і феромагнітною стінкою.

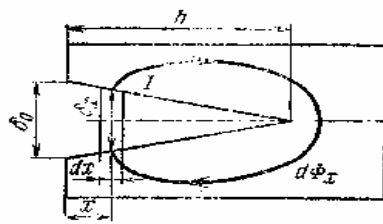


Рис. 12 – Електродинамічні зусилля, що діють на дугу в сталій решітці.

Магнітне поле не зміниться, якщо феромагнітну стінку відкинути, а замість неї симетрично розташувати другий провідник зі струмом (рис. 11). Довжина магнітної лінії зросте в 2 рази і сила, що намагнічує, також зросте в 2 рази.

У дугогасних камерах апаратів низької і високої напруги застосовують решітки з набору феромагнітних пластин з пазом.

Електрична дуга, що виникає між контактами апарата, є своєрідним провідником із струмом. Взаємодія цього провідника з решітками створює електромагнітну силу, рушійну дугу.

Розглянемо силу, що діє на провідник (дугу), симетрично розташований у пази клиновидного перерізу (рис. 12). Дуга знаходиться ліворуч координати $x + dx/2$. При розрахунку нехтуємо магнітним опором сталі й потоками розсіяння, що виходять з торця решітки.

Сила, що діє на провідник (дугу), дорівнює:

$$F_x = \frac{dW}{d} = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} i \psi \right) = \frac{1}{2} i \frac{d\psi}{dx} = \frac{1}{2} l \frac{d\Phi}{dx}.$$

Визначимо елементарний потік $d\Phi$, пов'язаний з провідником, що знаходиться на відстані x від гирла решітки:

$$d\Phi_x = l dG = l \mu_0 \frac{ldx}{\delta_x},$$

де dG – магнітна провідність проміжку завдовжки δ_x і з перетином $l dx$;

l – активна довжина решітки.

Одержимо:

$$F_x = \frac{1}{2} l \frac{d\Phi_x}{dx} = \frac{1}{2} \mu_0 l^2 \frac{l}{\delta_x} = \frac{1}{2} \mu_0 l^2 \frac{lh}{\delta_0(h-x)} = 2\pi \cdot 10^{-7} l^2 \frac{lh}{\delta_0(h-x)}, H.$$

де $\delta_x = \delta_0 (\mathbf{h}-\mathbf{x})/\mathbf{h}$ зазор, відповідний координаті x .

При зростанні x величина сили зростає, а при $x=\mathbf{h}$ сила досягає нескінченно великого значення.

Насправді зі зменшенням δ_x зростатиме падіння магнітного потенціалу в сталі.

Рівнянням можна користуватися тільки тоді, коли падіння магнітного потенціалу в сталі невелике (не більше 10% загальної магніторушійної сили).

Сила, що діє на дугу, може значно спотворюватися її формою. Після розходження контактів дуга має форму частини кола. Це, звичайно, призводить до того, що спочатку в решітку входить середня частина дуги, а потім крайні її частини. Тому проведений розрахунок має орієнтовний характер.

2.8. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ ПРИ ЗМІННОМУ СТРУМІ. МЕХАНІЧНИЙ РЕЗОНАНС

а) **Однофазний ланцюг.** Нехай струм не має аперіодичної складової і змінюється згідно із законом

$$i = I_m \sin \omega t,$$

де I_m – амплітудне значення струму; ω - кутова частота.

Якщо струми в провідниках мають однаковий напрям, то провідники притягуються і сила дорівнюватиме:

$$F = 10^{-7} k_r I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t),$$

де F_m - максимальне значення сили.

Таким чином, сила має постійну складову $F_m/2$ і змінну складову подвійної частоти $(F_m/2) \cos 2\omega t$. Середнє значення сили за період

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{F_m}{2} = 10^{-7} k_r I^2,$$

де I – діюче значення струму.

Зміна сили в часі при змінному струмі показана на рис. 13. Характерно, що в однофазному ланцюзі сила, змінюючись у часі, не змінює свого знаку.

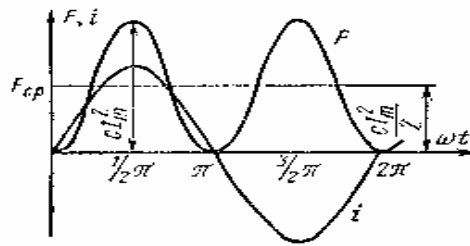


Рис. 13 – Залежність $F(t)$ при синусоїдальному струмі

При включенні на існуюче коротке замикання може виникнути аперіодична складова струму, величина якої залежить від моменту замикання ланцюга щодо нульового значення змінної складової сталого струму.

При розрахунку Е.Д.З. беруться найбільш важкий випадок, коли аперіодична складова струму максимальна. У більшості випадків можна припустити, що в процесі короткого замикання струм змінюється згідно із законом

$$i = I_m \left(e^{-tR/L} - \cos \omega t \right) = I_m \left(e^{-t/T_a} - \cos \omega t \right),$$

де R – активний опір ланцюга короткого замикання; L – індуктивність цього ланцюга; T_a – постійна часу аперіодичної складової.

Через час $t = \pi/\omega$ у ланцюзі настає ударний струм.

Ударний коефіцієнт $k_{уд}$ залежить від постійної часу T_a . Чим більше індуктивність L і менше активний опір R , тим більше $k_{уд}$. За інших рівних умов, із зростанням потужності установки зменшується опір і збільшується $k_{уд}$. При розрахунках приймають $k_{уд} = 1,8$. За наявності аперіодичної складової струму сила в часі змінюється за рівнянням

$$F = 10^{-7} k_r I_m^2 \left(e^{-t/T_a} - \cos \omega t \right)^2$$

і подана на рис. 14.

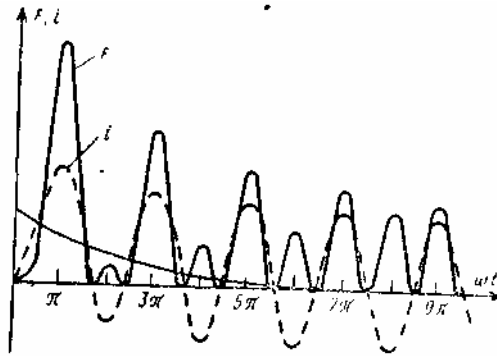


Рис. 14 – Залежність $F(t)$ при наявності аперіодичної складової струму

Найбільше значення сила має через півперіоду після початку короткого замикання:

$$F = 10^{-7} k_r k_{yd}^2 I_m^2 = 3,24 \cdot 10^{-7} k_r I_m^2.$$

Таким чином, аперіодична складова в 3,24 рази збільшує амплітуду сили.

б) **Електродинамічні сили в трифазному ланцюзі** за відсутності аперіодичної складової струму. Визначимо Е.Д.З., що діють на паралельні провідники трифазної системи, розташовані в одній площині (рис. 15).

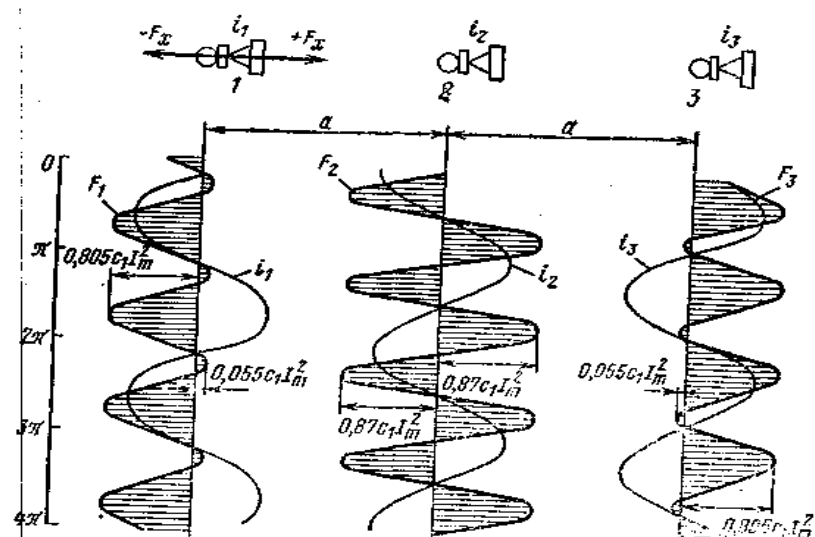


Рис. 15 – Визначення Е.Д.З., що діють у трифазному ланцюзі

Для простоти розрахунків покладемо, що відстань між шинами мала порівняно з їх довжиною, а струми проходять по геометричних осях

провідників. За позитивний напрям сили приймемо напрям осі x . Миттєві значення струмів, що течуть у провідниках, будуть:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \sin \omega t; \\ i_2 &= I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3 &= I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

Сила, що діє на провідник фази 1, дорівнює:

$$F_1 = F_{12} + F_{13}$$

де F_{12} – Е.Д.З. між провідниками фаз 1 і 2; F_{13} – Е.Д.З. між провідниками фаз 1 і 3. При прийнятих вище допущеннях

$$\begin{aligned} F_{12} &= c_1 I_m^2 \sin \omega t \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_{13} &= \frac{1}{2} c_1 I_m^2 \sin \omega t \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ F_{12} &= c_1 I_m^2 \sin \omega t \left[\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{aligned}$$

Провівши дослідження на максимум, одержимо, що максимальне значення відштовхуючої сили дорівнює:

$$F_{10TT.MAKC} = -0,805 c_1 I_m^2; \quad F_{3ПРИТ.MAKC} = 0,055 c_1 I_m^2.$$

Миттєве значення сили, що діє на середню фазу, дорівнює:

$$F_2 = F_{21} + F_{23} = c_1 I_m^2 \left(\sin \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \left[\sin \omega t + \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

Дослідження рівняння показує, що максимальне значення притягаючої сили дорівнює максимальному значенню відштовхуючої сили:

$$F_{20TT.MAKC} = F_{2ПРИТ.MAKC} = 0,87 c_1 I_m^2.$$

Провівши аналогічно розрахунок Е.Д.З. для третьої фази, одержимо:

$$F_{30TT.MAKC} = -F_{10TT.MAKC}; \quad F_{3ПРИТ.MAKC} = -F_{1ПРИТ.MAKC}$$

Наочне уявлення про сили, що виникають у трифазній системі, дає рис.15.

Найбільше зусилля діє на провідник середньої фази. Цей випадок беруть за розрахунковий:

$$F_{\text{МАКС.РАСЧ}} = 0,87c_1 I_m^2.$$

Для трифазної системи характерною є зміна знаку Е.Д.З. У трифазній системі струми зсунуті на 120° . Якщо в якийсь момент часу добуток миттєвих значень струмів двох сусідніх фаз позитивний, то внаслідок фазового зсуву в 120° в інший момент часу добуток миттєвих значень струмів може бути негативним.

Ізолятор фази 1 працює як на стиснення, так і на розтягування, причому зусилля, що розтягує, значно більше, ніж те, що стискає. Ізолятор фази 2 працює як на стиснення, так і на розтягування, причому максимальні розтягуючі й стискаючі зусилля однакові. Ізолятор фази 3 дістає як стискаючі, так і розтягуючі зусилля, причому стискаючі зусилля значно більше розтягуючих. Для фарфорових ізоляторів розтягуючі зусилля небезпечніші, ніж стискаючі, оскільки фарфор погано працює на розтягування. Якщо на рис.15 ізолятори розташувати вертикально, то вони працюють у легших умовах, оскільки деформація розтягування замінюється вигином.

в) Розрахунок електродинамічних сил у трифазній системі за наявності аперіодичної складової струму. В однофазній системі теоретично можливий випадок короткого замикання, при якому аперіодична складова струму буде дорівнювати нулю.

У трифазній системі при одночасному замиканні всіх трьох фаз аперіодична складова струму з'являється обов'язково, оскільки ні в який момент часу всі три струми не можуть дорівнювати нулю. Наявність цієї складової у струмі короткого замикання впливає на величини Е.Д.З., що діють на провідники.

Максимальне значення сил, що виникають у цьому випадку, залежить як від моменту включення щодо амплітуди періодичної складової струму, так і від часу. Вирішення цього питання пов'язане з великими труднощами. Тому розрахунок Е.Д.З. з урахуванням аперіодичної складової можна проводити за спрощеною методикою, яка дає результати з похибкою у бік запасу. Ця методика припускає, що у всіх трьох фазах проходить симетричний струм з амплітудою, яка дорівнює ударному струму. Тоді максимальне відштовхуюче зусилля, що діє на дріт фази 1, буде дорівнювати:

$$F_{\text{10ТТ.МАКС}} = 0,805c_1 (k_{\text{yo}} I_m)^2.$$

Максимальна сила, що діє на дріт середньої фази, дорівнює:

$$F_{\text{2МАКС}} = 0,87c_1 (k_{\text{yo}} I_m)^2.$$

г) Електродинамічна стійкість апаратів. Механічна міцність матеріалу залежить не тільки від значення сили, але й від її напрямку,

тривалості її дії, крутизни наростання. На жаль, у даний час відомості про роботу провідників і ізоляційних матеріалів у динамічному режимі вкрай обмежені. Тому розрахунок міцності конструкції, як правило, ведеться виходячи з максимального значення сили, хоча діє ця сила короткочасно.

У однофазних установках розрахунок Е.Д.З. ведуть по ударному струму короткого замикання.

Якщо коротке замикання відбулося поблизу генератора, то за розрахункову величину беруть амплітуда надтрифазного короткого замикання.

Для трифазного апарата за розрахунковий струм беруть

$$i_{y0} = k_{y0} I_{m3},$$

де струм I_{m3} – амплітуда періодичної складової трифазного короткого замикання.

Розрахунок стійкості проводиться для середньої фази, що дає найбільші значення сил.

Для провідникових матеріалів рекомендується не перевищувати наступні значення механічних напруг: для міді МТ 140 МПа, для алюмінію АТ 70 МПа.

Ізоляція електричних апаратів і елементів розподільних пристроїв може працювати як у відкритому розподільному пристрої, так і всередині приміщення. У першому випадку вона піддається дії як Е.Д.З., так і додаткового навантаження – дії вітру, ожеледиці, тяжінню провідників, які підводяться, у другому – тільки дії Е.Д.З. Тому в першому випадку результуюче навантаження на ізолятори й ізоляційні деталі беруть в 3 рази менше того, що руйнує. У другому випадку коефіцієнт запасу може бути зменшений до 1,5-1,7.

д) **Механічний резонанс.** При розрахунку електродинамічної стійкості апарата не можна випускати з уваги можливість появи резонансу між гармонійно змінною електродинамічною силою і власними механічними коливаннями деталей струмоведучого кола апарата.

У разі, коли частота змінної складової сили близька до власної частоти механічних коливань, навіть при порівняно невеликих силах можливе руйнування апарата внаслідок явищ резонансу. Для шин прямокутного і круглого перерізу цю частоту можна визначити приблизно за допомогою формули

$$f = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{Ej}{\gamma g}},$$

де γ – щільність матеріалу шини, кг/м^3 ;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; l – проліт між ізоляторами, м; E – модуль пружності матеріалу шин, Па; J – момент інерції перерізу шини, м^4 ; q – переріз шини, м^2 ; k – коефіцієнт, що залежить від характеру кріплення шин ($k = 11,2$ при жорсткому кріпленні шин і ізоляторів, $k = 7,8$ при вільному кріпленні на одній опорі й жорсткому на іншій; $k = 4,9$ для шин, які вільно лежать на опорах).

З формули видно, що для шин заданої форми і перерізу власна частота легко може змінюватися за рахунок зміни прольоту. Якщо не вдається з яких-небудь причин одержати власну частоту нижче за основну частоту сили, то вибирають власну частоту механічних коливань вище за подвійну частоту сили.

При гнучкому кріпленні провідників власна частота механічних коливань знижується. Завдяки еластичній підвісці енергія електродинамічних сил тільки частково витрачається на деформацію струмоведучих частин. Інша частина енергії витрачається на переміщення провідників і пов'язаних з ними гнучких підвісів. При цьому механічні напруги в матеріалі шин зменшуються.

Тема 3. НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

3.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

При роботі апарата в його струмоведучому ланцюзі, ізоляції і деталях конструкції виникають втрати електричної енергії, що перетворюються в тепло.

Теплова енергія частково витрачається на підвищення температури апарата і частково віддається в навколишнє середовище.

При збільшенні температури відбувається прискорене старіння ізоляції провідників і зменшення їхньої механічної міцності. Так, якщо при даній припустимій тривалій температурі θ_n термін служби ізоляції провідників дорівнює t_n , то при зростанні тривалої температури усього лише на 8°C термін служби скорочується в 2 рази. При значному підвищенні температури ізоляція плавиться і навіть згоряє. Це приведе до короткого замикання (КЗ) і виходу апарата з ладу.

При збільшенні температури міді з 100 до 250°C механічна міцність знижується на 40 %. Слід мати на увазі, що при короткому замиканні, коли температура може досягати граничних значень ($200\text{—}300^\circ\text{C}$), струмоведучі частини піддаються впливу великих електродинамічних сил.

Робота контактних з'єднань також сильно залежить від температури.

Нагрівання струмоведучих частин і ізоляції апарата значною мірою визначає його надійність. Тому у всіх можливих режимах роботи **температура** частин апарата не повинна перевершувати таких значень, при яких **забезпечується його тривала надійна робота.**

3.2. АКТИВНІ ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ В АПАРАТАХ

а) Втрати в струмоведучих частинах. В апаратах постійного струму нагрів відбувається тільки за рахунок втрат в активному опорі струмоведучого ланцюга.

Енергія, що виділяється в провіднику, дорівнює:

$$W = \int_0^t i^2 R dt,$$

де W — енергія, Дж;

i — струм у ланцюзі, А;

R — опір, Ом;

t — тривалість протікання струму, с.

Для однорідного провідника опір R легко знайти, знаючи властивості матеріалу, довжину й переріз провідника.

При змінному струмі активний опір провідника відрізняється від опору при постійному струмі через виникнення **поверхневого ефекту й ефекту близькості.**

Опір при змінному струмі $R \sim$ визначається рівнянням

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma} k_d,$$

де R_{Σ} — опір при постійному струмі;

k_d — коефіцієнт додаткових втрат, викликаних поверхневим ефектом і ефектом близькості.

Відомо, що чим більше частота струму, чим менше питомий опір провідника, тим більше поверхневий ефект.

У феромагнітних матеріалах поверхневий ефект різко зростає через збільшення магнітної проникності провідників. Істотну роль відіграють форма і розміри провідника, чим більше його діаметр, тим більше поверхневий ефект.

При використанні провідників великого перерізу через поверхневий ефект внутрішня частина перерізу не обтікається струмом і фактично не використовується. У цьому разі застосовують струмоведучий ланцюг трубчастого чи коробчастого перерізів. Коробчастий переріз у порівнянні з круглим є кращим, тому що збільшується поверхня охолодження при тому ж перерізі, зростає механічна міцність. Коробчасту шину виконують у вигляді двох половин, між якими вводять зазор, що забезпечує охолодження внутрішньої поверхні шинопроводу. Коефіцієнт k_n для коробчастого перерізу наведений у [6].

Розрахунок коефіцієнта додаткових втрат від поверхневого ефекту k_n проводять за спеціальними кривими (рис. 16—18). При користуванні кривими рис. 1 і 2 діаметр d беруть в міліметрах, частоту f у герцах і питомий опір ρ в Ом·мм (10⁶ Ом·мм²/м) при температурі провідника. При використанні графіка на рис. 18 переріз q беруть в мм², а ρ — у мкОм·м.

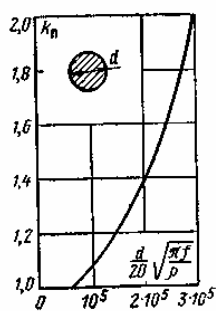


Рис. 16

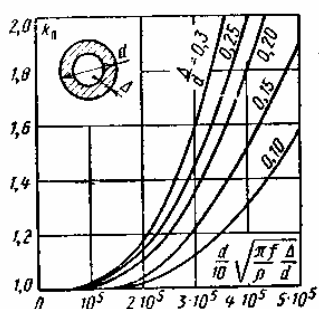


Рис. 17

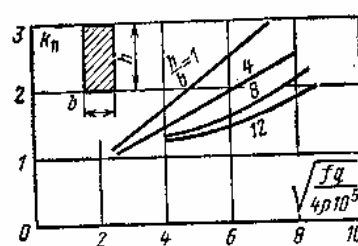


Рис. 18

Рис. 16 – Визначення k_d для суцільного круглого провідника.

Рис. 17 – Визначення k_d для порожнистого круглого провідника.

Рис. 18 – Визначення k_d для шин прямокутного перерізу.

ПРИКЛАД Коефіцієнт додаткових втрат k_n визначимо за допомогою рис. 16.

Питомий опір ρ при температурі 105°C :

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 105) = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом м.}$$

$$\text{Аргумент } \frac{d}{20} \sqrt{\frac{\pi f}{\rho}} = \frac{35}{20} \sqrt{\frac{\pi \cdot 50}{2,2 \cdot 10^{-8}}} = 1,45 \cdot 10^5.$$

Тодя $k_0 = 1,2$.

Відношення активного опору провідника, що знаходиться в магнітному полі інших провідників, до опору відокремленого провідника називається **коефіцієнтом близькості**:

$$k_6 = R_{\text{л}} / R_{\text{нр}}$$

Аналогічно поверхневому ефекту ефект близькості росте з частотою струму, провідністю матеріалу і залежить від форми і взаємного розташування провідників. Чим ближче розташовані провідники один до одного, тим сильніше магнітне поле від сусіднього провідника і тем більше ефект близькості.

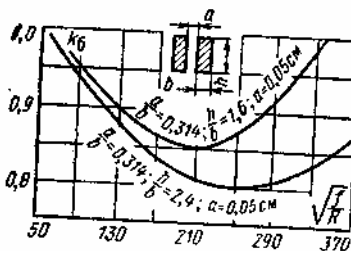
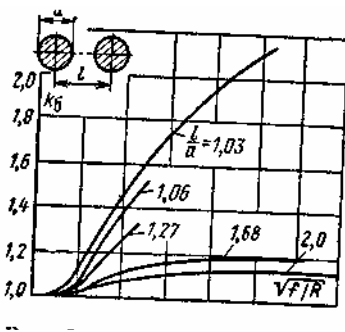


Рис. 19 – Коефіцієнт близькості k_6 для провідників круглого перерізу.

Рис. 20 – Коефіцієнт близькості k_6 для шин прямокутного перерізу.

На рис. 19 і 20 наведені опори R в омах при довжині 100 м, частота f у герцах. Струми в провідниках мають протилежні напрямки

На відміну від коефіцієнта поверхневого ефекту k_n коефіцієнт близькості k_6 може бути й менше одиниці, тому що за рахунок магнітного поля сусідніх провідників можливе вирівнювання щільності струму по перерізу. Коефіцієнт близькості залежить також і від напрямку струму в сусідніх провідниках.

Звичайно коефіцієнт близькості знаходять за допомогою кривих на рис. 19 і 20. Для трифазної системи провідників картина впливу сусідніх фаз значно ускладнюється.

Однак **можна вказати** ті мінімальні відстані між сусідніми фазами, при яких ефект близькості практично незначний. Так, при циліндричних провідниках $k_6 = 1$, якщо відстань між фазами $L \geq 6d$, де d — діаметр провідника. Для прямокутних шин у трифазній системі $k_6 = 1$, якщо $L \geq 3a$, де a

— найбільший розмір поперечного перерізу.

Коефіцієнт додаткових утрат:

$$k_d = \frac{R_{\approx}}{R_{\approx}} = \frac{R_{\text{вЕД}} k_{\sigma}}{R_{\approx}} = k_n k_{\sigma}.$$

Якщо струмоведуча частина виконана з феромагнітного матеріалу (сталі), то поверхневий ефект різко збільшується. Справа в тому, що магнітна проникність сталі на багато порядків вище, ніж у міді чи алюмінію. Це, у свою чергу, збільшує потік, що пронизує провідник і струми, що викликаються цим потоком.

Коефіцієнт додаткових утрат k_d для сталевого проводу невеликого діаметра ($d=16$ мм) знаходиться в межах 4—8 і змінюється від струму приблизно так само, як проникність μ , залежить від напруженості H .

Через різке збільшення k_d у феромагнітних матеріалах при великих струмах їх не застосовують для виготовлення струмоведучих елементів.

б) Втрати в неструмоведучих феромагнітних частинах. При змінному струмі крім активних втрат у струмоведучому ланцюзі з'являються активні втрати у феромагнітних деталях апаратів, розташованих у змінному магнітному полі.

Розглянемо проходження змінного магнітного потоку вздовж осі масивного циліндричного стрижня.

Під дією потоку в елементарних циліндричних шарах з'являються Е.Д.З. і вихрові струми таких напрямків, при яких створювані ними потоки протидіють зміні основного потоку (правило Ленца). Через розмагнічуючу дію цих струмів магнітний потік по перерізі розподіляється нерівномірно, причому магнітна індукція має найменше значення в центрі стрижня.

Приблизний розподіл індукції і щільності струму уздовж радіуса поданий на рис. 21. Без великої похибки можна вважати, що на глибині a від зовнішньої поверхні індукція залишається постійною. При дальшому наближенні до центру вона різко падає до нуля. Товщина шару a , протягом якої індукція постійна, називається глибиною проникнення потоку. Ефект цей аналогічний поверхневому ефекту в провідниках. Розрахунки і дослідження показують, що в більшості практичних випадків товщина шару a складає кілька міліметрів і значно менше, ніж радіус стрижня.

Розрахунок глибини проникнення і потужності втрат докладно розглянутий у [6]: Наводимо остаточне вирішення:

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_a}}$$

де a — глибина проникнення, м;

ρ – питомий опір, Ом-м;

ω – кругова частота, с;

μ_a – абсолютна проникність матеріалу, Г/м.

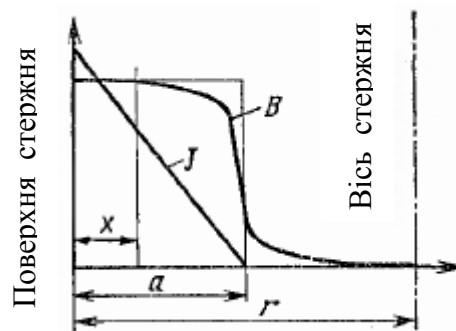


Рис.21 – Розподіл індукції B і щільності струму j в феромагнітному циліндрі при проходженні змінного потоку вздовж осі

Чим менше питомий опір осердя, чим вище частота потоку і магнітна проникність, тим сильніше ефект витіснення потоку.

Крім утрат від вихрових струмів, виникають додаткові втрати на перемагнічування за рахунок гістерезису.

Для зменшення втрат у магнітопроводах апаратів їх виконують шихтованими з листів електротехнічної сталі товщиною 0,2—0,5 мм, ретельно ізолюваних один від одного. Сталь повинна мати малі втрати на вихрові струми і гістерезис. Повні втрати в магнітопроводі $P_{\text{ж}}$ можна знайти за формулою

$$P_{\text{ж}} = (\chi_{\Gamma} B_m^{1,6} + \chi_{\text{в}} f B_m^2) f G_{\Gamma},$$

де B_m – максимальне значення індукції, Т;

f – частота, Гц;

χ_{Γ} і $\chi_{\text{в}}$ – коефіцієнти втрат від гістерезису і вихрових струмів;

G_{Γ} – маса магнітопроводу, кг.

Для трансформаторних сталей (Е41-Е43) $\chi_{\Gamma} = 1,9\text{--}2,6$, $\chi_{\text{в}} = 0,4\text{--}1,2$.

Для зменшення втрат у масивних деталях застосовують такі методи:

а) введення немагнітних зазорів на шляху потоку (зменшується потік за рахунок зростання магнітного опору ланцюга);

б) на масивний магнітопровід надівається короткозамкнутий виток (струм, що виникає в короткозамкнутому витку, зменшує потік, це призводить до зниження втрат);

в) при великих номінальних струмах (вище 1000 а) конструкційні деталі виготовляють з немагнітних матеріалів: силуміну, дюралюмінію, бронзи, немагнітного чавуну та ін.

В апаратах змінного струму високої напруги, крім втрат у провідникових і феромагнітних матеріалах, необхідно враховувати втрати, що

виникають в ізоляції. Ці втрати визначаються формулою

$$P = 2\pi fCU^2 \operatorname{tg} \delta,$$

де f – частота;
 C – ємність ізоляції;
 U – діюче значення напруги на ізоляції;
 $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

Ізоляція апарата нагрівається як за рахунок втрат у струмоведучому ланцюзі, так і за рахунок втрат у діелектрику.

$$\operatorname{tg} \delta = 0,005 \div 0,0001$$

Поява дефектів в окремих місцях ізоляції (при цьому збільшується $\operatorname{tg} \delta$) призводить до виникнення місцевих теплових виділень, які здатні викликати тепловий пробій ізоляції (ізоляція обуглюється і стає провідною).

4) Інші види джерел теплоти в електричних апаратах:

а) Енергія, що виділяється в електричних дугах, у комутаційних апаратах, особливо при частих включеннях, відключеннях.

б) При терті між собою окремих елементів електричних апаратів.

Нагрівання електричних апаратів викликає прискорене старіння ізоляції і підвищує швидкість окислювання електричних контактів, що в остаточному підсумку знижує термін служби електричного апарата.

3.3. СПОСОБИ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛА ВСЕРЕДИНІ НАГРІТИХ ТІЛ І З ЇХНЬОЇ ПОВЕРХНІ

Розрізняють три види теплообміну: *теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.*

а) Теплопровідність. Теплопровідністю називається процес поширення тепла між безпосередньо дотичними частинками, обумовлений тепловим рухом молекул чи атомів речовини, а в металах — вільних електронів.

Математично цей процес описується рівнянням Фур'є

$$d^2Q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dS dt,$$

У цьому рівнянні:

d^2Q – кількість тепла, переданого в напрямку x за рахунок теплопровідності;

λ – питома теплопровідність матеріалу, через який йде передача тепла;

θ – температура;

d – поверхня, через яку протікає тепло;

dt – час, протягом якого протікає тепло d^2Q .

Величина $d\theta/dx$ називається градієнтом температури і характеризує швидкість зміни температури в напрямку x , перпендикулярному до площадки

d. З цього рівняння випливає:

$$\lambda = \frac{d^2 Q}{-\frac{\partial \theta}{\partial x} dS dt}.$$

Таким чином, **питома теплопровідність λ** – це кількість тепла, що проходить через одиницю поверхні в 1 с при градієнті температури $1 \text{ С} \cdot \text{м}^{-1}$.

Від’ємний знак правої частини зумовлений тим, що теплова енергія поширюється від точок з більшою температурою до точок з меншою температурою, тобто в напрямку, протилежному градієнту температури.

Температурне поле може бути тривимірним. Тому, розглядаючи тепло, передане в напрямку x , ми беремо частинну похідну від температури по координаті x .

Як приклад застосуємо рівняння для знаходження питомої теплопровідності λ для відшукування розподілу температур у стінці, що розділяє два середовища, які мають різні температури θ_1 і θ_2 (рис. 22).

Перетворюючи це рівняння, матимемо:

$$\frac{d^2 Q}{dS dt} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} = \Phi_0;$$

де Φ_0 – кількість тепла, що проходить через поверхню в 1 м^2 за 1 с , і називається **щільністю теплового потоку**.

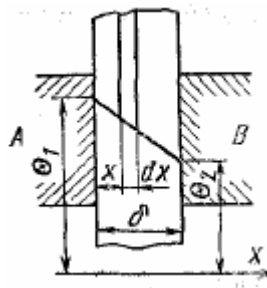


Рис. 22 – До розрахунку перепаду температури в плоскій стінці

Для сталого режиму ця величина постійна:

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{d\theta}{dx}.$$

Провівши інтегрування, отримаємо:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} -d\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{\Phi_0 x}{\lambda} \int_0^{\delta} = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda}.$$

Таким чином, спад температури вздовж координати x відбувається за

лінійним законом.

Іноді для зручності розрахунків вводиться поняття теплового опору R_T . Потік, що проходить за 1 с через усю поверхню, дорівнює:

$$\Phi = \Phi_0 S.$$

Скориставшись двома останніми формулами, отримаємо:

$$\Delta\theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi \delta}{\lambda S} = \Phi R_T,$$

де R_T — тепловий опір стінки.

Останнє рівняння аналогічне рівнянню (закону) Ома для електричного ланцюга і називається **тепловим законом Ома**: падіння температурного потенціалу дорівнює добутку потоку на тепловий опір. Тепловий опір пропорційний довжині шляху потоку δ і обернено пропорційний перерізу і питомій теплопровідності. З цього рівняння можна отримати:

$$\Phi = \Delta\theta / R_T,$$

Кількість тепла Φ , що відводиться в 1 с від тіла за рахунок теплопровідності, прямо пропорційна перепаду температури $\Delta\theta$ і обернено пропорційна тепловому опору R_T того тіла, через яке передається тепло.

Якщо тепловий потік проходить через ряд стінок з товщиною δ_i теплопровідністю λ_i , то тепловий опір дорівнює:

$$R_T = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{1}{S} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right).$$

Дані про питому теплопровідність матеріалів наведені в [6].

б) Конвекція — це перенесення тепла, пов'язане з переміщенням мікрооб'ємів нагрітого газу або рідини. При природній конвекції рух газу, що охолоджує, або рідини відбувається за рахунок різниці густини нагрітих і холодних об'ємів газу чи рідини.

При штучній конвекції рух середовища, що охолоджує, виконується за допомогою вентиляторів або насосів. Кількість тепла, що віддається тілом за рахунок конвекції, визначається у найпростішому випадку з рівняння

$$\Phi_K = \alpha_K (\theta_2 - \theta_1) S,$$

де Φ_K — тепло, що відводиться в 1с з поверхні S , Вт;

α_K — коефіцієнт тепловіддачі при конвекції — тепло, що знімається за 1 с

із поверхні в 1 м^2 при різниці температур поверхні й середовища, що охолоджує, 1°C , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

θ_2 — температура охолоджуваної поверхні, $^\circ\text{C}$;

θ_1 — температура середовища, що охолоджує, $^\circ\text{C}$;

S — охолоджувана поверхня, м^2 .

Коефіцієнт тепловіддачі α_k є складною функцією багатьох факторів, у тому числі:

а) температури, в'язкості й щільності середовища, що охолоджує;

б) виду охолоджуваної поверхні і її розташування щодо потоку середовища, що охолоджує, і поля тяжіння;

в) швидкості вимушеного руху середовища.

У більшості випадків коефіцієнт α_k визначають за емпіричними формулами.

Кількість тепла, що відводиться за рахунок конвекції, нелінійно залежить від перепаду температур, тому що коефіцієнт α_k також являє собою нелінійну функцію цього перепаду.

Для горизонтальних круглих провідників діаметром від 1 до 8 см:

$$\alpha_k = 3,5 \cdot (1/d)^{1/4} \cdot (\theta_2 - \theta_1)^{1/4}.$$

Для встановлених на ребро шин:

$$\alpha_k = 1,5 \cdot (\theta_2 - \theta_1)^{0,25}.$$

Горизонтальна площа, обернена нагрітою поверхнею униз:

$$\alpha_k = 3,25 \cdot (\theta_2 - \theta_1)^{1/4}.$$

Вертикальна площа у трансформаторному маслі:

$$\alpha_k = 43 \cdot (\theta_2 - \theta_1)^{1/4}.$$

Горизонтальний циліндр у трансформаторному маслі

$$\alpha_k = 160 \cdot (\theta_2 - \theta_1)^{0,3}.$$

Вертикальна шорстка стінка в потоці повітря, що рухається зі швидкістю v , м/с:

$$\alpha_k = 6 + 4,2 \cdot v.$$

Більш точно коефіцієнт тепловіддачі α_k можна розрахувати за допомогою теорії подібності [6].

У зв'язку з тенденцією збільшення номінального (тривалого) струму

апаратів дуже перспективним є застосування штучної конвекції. Це дозволяє знизити розміри апаратів, полегшити контакти, збільшити швидкодію і зменшити витрати кольорових металів . Прикладом є комп'ютер.

в) Випромінювання. Частину тепла нагріте тіло віддає в навколишній простір шляхом випромінювання електромагнітних коливань (ультрафіолетових, світлових і інфрачервоних променів). Цей спосіб тепловіддачі називається *випромінюванням*, або *радіацією*. Тепло, втрачене тілом за рахунок випромінювання, може бути визначене за допомогою рівняння Стефана — Больцмана,

$$\Phi_{\text{л}} = c_0 \epsilon \left[\left(\frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] S,$$

де $\Phi_{\text{л}}$ — тепло (Вт), що віддається за 1 с із поверхні $S(\text{м}^2)$ при температурі тіла $T_2(\text{К})$ і навколишній температурі далеко від тіла $T_1(\text{К})$; c_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла і ϵ — ступінь чорності випромінюючого тіла.

Значення c_0 приймають рівним $5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$, значення ϵ наведені в [6].

Таким чином, тепло, що віддається тілом за рахунок випромінювання, залежить від різниці значень абсолютних температур нагрітої поверхні і навколишніх тіл, взятої у четвертому ступені.

З рівнянь випливає, що сумарна кількість тепла, що віддається тілом усіма видами тепловіддачі, нелінійно залежить від температури, що значно ускладнює розрахунок. Тому в кожному **конкретному** випадку необхідно зробити оцінку всіх видів тепловіддачі і розрахунок вести за тим з них, що має основне значення. Так, для довгих шин теплопровідністю можна знехтувати і взяти до уваги тільки випромінювання і конвекцію. Якщо провідники занурені в технічну олію, то основним видом тепловіддачі є конвекція.

Для проведення наближених розрахунків користуються наступною методикою.

Введемо поняття **перевищення температури τ** , що дорівнює різниці температур тіла θ_2 і оточуючого середовища θ_1 .

Кількість тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$), що віддається тілом за 1 с із 1 м^2 поверхні при $\tau = 1^\circ\text{С}$, дорівнює:

$$\frac{\Phi}{S(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{\Phi}{S\tau} = f(\theta_2, \theta_1) = k_\tau.$$

Величина k_T є складною функцією температури та інших фізичних параметрів. Тепловий розрахунок значно спростився б, якби k_T була постійною величиною. У діапазоні робочих температур тривалого режиму ($\theta_2 = 90 \div 120^\circ \text{C}$) коефіцієнт k_T змінюється з температурою незначно, і для наближених розрахунків (з точністю 15—20%) можна вважати його постійною величиною. При цьому одержуємо відому **формулу Ньютона**

$$\Phi = k_T S \tau.$$

Коефіцієнт k_T називають питомим узагальненим коефіцієнтом тепловіддачі або просто **питомим коефіцієнтом тепловіддачі**. Фізичний зміст цього коефіцієнта — потужність, що віддається з одиниці поверхні охолодження при перевищенні температури в 1°C ($1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1} = 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$). Значення цього коефіцієнта для різних елементів апаратів наведені в [7].

У таблиці подані значення коефіцієнта k_T для випадків, що зустрічаються найбільш часто.

Рівняння дає можливість легко знайти τ , якщо відомі розміри тіла і тепловий потік, що віддається в навколишній простір. Завдяки своїй простоті рівняння знайшло широке застосування, особливо при розрахунку температури тіла в несталих режимах. Однак слід зазначити, що більш високу точність і широкі можливості дає роздільне врахування віддачі тепла конвекцією і випромінюванням [5-7].

3.4. СТАЛИЙ ПРОЦЕС НАГРІВАННЯ

Процес нагрівання вважається **сталим**, якщо з часом температура апарата і його частин не змінюється (зрозуміло, при дотриманні сталості умов віддачі тепла в навколишній простір). У сталому процесі все тепло, що виділяється, віддається в навколишній простір. В іншому випадку частина тепла йшла б на нагрівання апарата і його температура змінювалася.

а) Розрахунок перерізу провідника за тривалим режимом. Для круглого провідника

$$R = \frac{4\rho_0(1 + \alpha\theta_H)l}{\pi d^2},$$

де ρ_0 — питомий опір матеріалу при 0°C ;

d — діаметр провідника;

l — його довжина;

α — температурний коефіцієнт опору;

θ_H — припустима температура в номінальному режимі, $^\circ \text{C}$.

Одержимо:

$$\frac{4l^2\rho_0(1 + \alpha\theta_H)}{\pi d^2} = k_T \pi d (\theta_H - \theta_0),$$

де θ_0 — температура навколишнього середовища. Розв'язуючи рівняння відносно d , маємо:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4l^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_H)}{\pi^2 k_T (\theta_H - \theta_0)}}.$$

Вибираючи діаметр з деяким запасом, розраховуємо коефіцієнт додаткових утрат k_d , і *остаточну перевірку проводимо за формулою*:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4l^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_H) k_d}{\pi^2 k_T (\theta_H - \theta_0)}}.$$

Для провідників прямокутного перерізу (шин)

$$R = \rho_0 \frac{1 + \alpha \theta_H}{ab} l,$$

де a і b — сторони перерізу шини.

Аналогічно тому, як це зроблено вище, одержимо:

$$ab(a + b) = \frac{l^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_H)}{2k_T (\theta_H - \theta_0)}.$$

З конструктивних міркувань і з умов механічної міцності задаються співвідношенням $m = a/b$ (у межах 3—10). Тоді:

$$b = \sqrt[3]{\frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_H)}{m(m+1)2k_T (\theta_H - \theta_0)}}.$$

Визначивши потім a , знаходять коефіцієнт додаткових втрат k_d і проводять перевірку з урахуванням цього коефіцієнта.

Нагрівання котушок. Розрахунок розподілу температури всередині котушки є надзвичайно важким завданням. Тіло котушки неоднорідне. Тепловий потік проходить через повітряні зазори, міжшарову й виткову ізоляцію і метал проводу. Для полегшення задачі оперують з еквівалентною теплопровідністю, при якій усереднене температурне поле в котушці таке ж, як і в реальній задачі [1]. Тепло, що виділяється в котушці (рис. 23), в остаточному підсумку віддається через зовнішню циліндричну поверхню $2\pi m_2 h$, через внутрішню циліндричну поверхню $2\pi m_1 h$ і через верхній і нижній торці котушки.

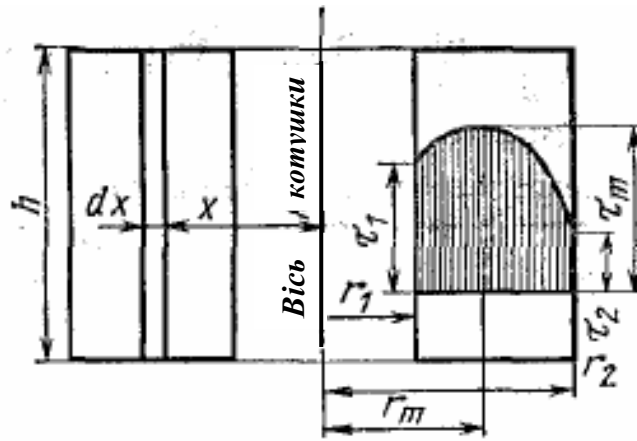


Рис. 23 – До розрахунку температури в котушці

У результаті теплове поле котушки виходить дуже складним. Для того щоб одержати хоча б наближене вирішення задачі, робляться такі припущення, що спрощують його:

1. Тепловий потік йде тільки через внутрішню і зовнішню циліндричні поверхні, потоки з торців відсутні. Це припущення виправдується у випадку, коли щічки каркаса котушки виконані з товстих пластин гетинаксу чи текстоліту, або при великій довжині котушки. При цьому допущенні ізотермічні поверхні будуть циліндрами з віссю, що збігається з віссю котушки.

2. Втрати в котушці рівномірно розподілені за об'ємом котушки. У дійсності найбільш нагріті шари обмотки мають більший опір, і, отже тут буде виділятися більша потужність.

3. Тіло котушки є однорідним матеріалом з еквівалентною теплопровідністю λ_e .

У сталому режимі нагрівання обмотки в будь-якій точці тіла кількість тепла, що підходить до даного елемента і виділяється в ньому, повинна дорівнювати кількості тепла, що йде з цього елемента. У разі порушення цього балансу температура точки повинна зростати або падати.

3.5. НАГРІВАННЯ АПАРАТІВ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

а) Перехідний процес при нагріванні й охолодженні. Після включення апарата температура його елементів не відразу досягає сталих значень. Якщо тепло, що віддається в навколишній простір, можна розрахувати за формулою Ньютона, то енергетичний баланс при нагріванні тіла виражається рівнянням:

$$Pdt = k_T S \tau dt + Cd\theta,$$

де P – потужність теплових втрат у тілі;

C – теплоємність тіла, дорівнює $C = cM$;

c – питома теплоємність одиниці маси, Вт с/кг °С;

M – маса тіла, кг.

Перший член правої частини цього рівняння є кількість тепла, що віддається тілом у навколишнє середовище за час dt ; другий – кількість тепла, сприймана тілом при зміні його температури на $d\theta$. При сталості температури навколишнього середовища θ_0 , мабуть, $d\theta = d\tau$, тому що $\tau = \theta - \theta_0$

Можливі три режими роботи апарата. Перший режим характеризується сталістю потужності, що до нього підводиться:

$$P = I_0^2 R_0 = \text{const.}$$

Цей випадок зустрічається при послідовному включенні апарата в ланцюг і незначній зміні його опору R_0 із зростанням температури. При другому режимі струм через апарат у процесі нагрівання не змінюється $I_0 = \text{const}$, тому що його опір значно менший за опір навантаження і опір іншої частини ланцюга. Унаслідок нагрівання опір струмоведучого ланцюга апарата змінюється. Тоді потужність, що підводиться до апарата, дорівнює:

$$P = I_0^2 R = I_0^2 R_0 (1 + \alpha_r \theta) = I_0^2 R_0 [1 + \alpha_r (\theta_0 + \tau)]$$

При третьому режимі обмотка апарата підключена до напруги U джерела нескінченної потужності. Звичайно так включаються котушки контакторів, реле напруги, проміжних реле. У цьому разі

$$P = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha_r \theta)} = \frac{U^2}{R_0 [1 + \alpha_r (\theta_0 + \tau)]}$$

Розв'язання не викликає труднощів:

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T})$$

де τ_0 — перевищення температури на початку процесу ($t = 0$);

τ_y — усталене перевищення температури, дорівнює $\tau_y = P/k_T S$;

T — стала часу нагрівання, дорівнює $cM/k_T S$, с.

Залежність $\tau(t)$ зображена на рис. 24 (крива 1). При $\tau_0 = 0$ крива $\tau(t)$ має вигляд, наведений на рис. 24 (крива 2). Очевидно, що чим більше T , тим повільніше нагрівається тіло.

В усталеному режимі усе виділюване тепло віддається в навколишнє середовище.

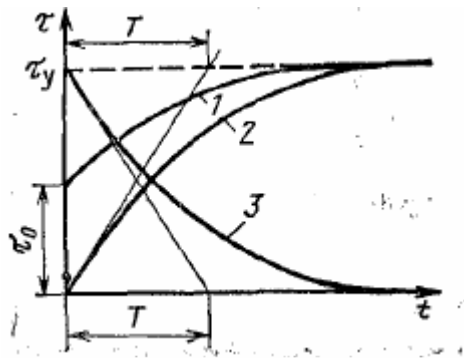


Рис. 24 – Перехідний процес нагріву і охолодження однорідного тіла

Проведемо дотичну на початку координат до кривої $\tau(t)$:

$$\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\tau_y}{T}, \text{ або } T = \frac{\tau_y}{\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0}}.$$

Дотична до кривої $\tau(t)$ на початку координат відтинає на прямої τ_y відрізок, що дорівнює в обраному масштабі сталій часу.

Якби нагрівання тіла відбувалося без віддачі тепла в навколишній простір, то треба було записати у вигляді

$$Pdt = Cd\tau.$$

Розв'язуючи його, одержуємо:

$$\tau = \frac{P}{C}t. \text{ Але } P = k_T S \tau_y, \text{ а } T = \frac{C}{k_T S}, \text{ то } \tau = \frac{\tau_y}{T}t,$$

тобто підйом температури тіла відбувається по дотичній до кривої $\tau(t)$ на початку координат. При $t = T$ перевищення температури $\tau = \tau_y$.

Таким чином, постійна часу T є час, протягом якого тіло нагрілося б до сталої температури за умови відсутності віддачі тепла в навколишній простір.

Якщо $e^{-t/T}$ розкласти в ряд, то при $\tau_0 = 0$ одержимо:

$$\tau = \tau_y \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{t}{T} \right)^3 - \dots \right].$$

При $t/T < 0,1$ не вносячи помилки, більшої за 5%, можна відкинути всі члени, крім першого. Тоді

$$\tau = \tau_y \frac{t}{T}.$$

Таким чином, якщо тривалість нагрівання не перевищує однієї десятої від сталої часу, можна знехтувати віддачею тепла в навколишнє середовище.

Після відключення апарата тепло, накопичене у процесі нагрівання, віддається в навколишнє середовище. Енергетичний баланс при охолодженні тіла виражається рівнянням

$$Cd\tau = k_T S \tau dt$$

Розв'язання рівняння відносно τ має вигляд:

$$\tau = \tau_y e^{-t/T}.$$

Крива $\tau(t)$ при охолодженні показана на рис. 24 (крива 3).

б) Нагрів апаратів при короткочасному режимі роботи. Короткочасним режимом роботи апарата називається такий режим, коли при включенні температура його не досягає усталеної. Після короткочасного нагрівання апарат відключається, його температура падає доти, поки не зрівняється з температурою навколишнього середовища.

Типові криві нагрівання і охолодження зображені на рис. 25. Звичайно тривалість $t_{кр}$ проходження струму $I_{кр}$ вибирається таким чином, щоб температура струмоведучих частин не перевищувала припустимого значення ($\tau = \tau_{доп}$)

Якщо $\tau_{кр}$ — усталене перевищення температури у випадку, коли струм $I_{кр}$ проходить нескінченно довго, тоді можна знайти час $t_{кр}$, після закінчення якого перевищення температури буде дорівнювати припустимому.

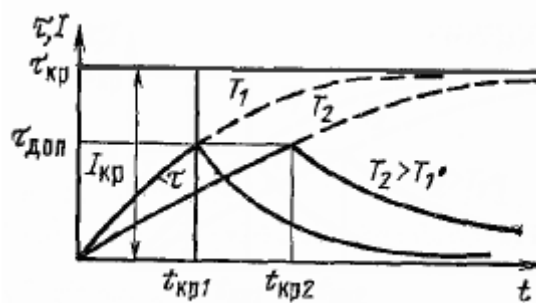


Рис. 25 – Нагрів при короткочасному режимі роботи

$$t_{кр} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{\tau_{доп}}{\tau_{кр}}}.$$

Із рівняння випливає, що чим більше стала часу, тим протягом

більшого часу може проходити струм через апарат. Вплив сталої часу T на час включення $t_{кр}$ наочно показує рис. 25.

Знайдемо зв'язок між припустимим струмом при тривалому включенні і припустимим струмом короткочасного режиму $I_{кр}$. Враховуючи, що

$$\tau_{доп} = \frac{I_{дл}^2 R}{k_T S}, \text{ а } \tau_{кр} = \frac{I_{кр}^2 R}{k_T S},$$

$$I_{дл}^2 = I_{кр}^2 \left(1 - e^{-t_{кр}/T} \right);$$

$$I_{кр} = I_{дл} \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}}.$$

Для характеристики короткочасного режиму вводиться поняття коефіцієнта перевантаження $\rho = I_{кр}/I_{дл}$, який показує, в скільки разів може зрости припустиме навантаження по струму при короткочасному режимі порівняно з тривалим режимом:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}}.$$

Аналіз показує, що при незмінному значенні часу включення апарата $t_{кр}$ припустимий струм короткочасного режиму $I_{кр}$, а, отже, і коефіцієнт перевантаження ростуть зі збільшенням сталої часу. У зв'язку з цим в апаратах, які працюють у короткочасному режимі, рекомендується збільшувати сталу часу, що дозволяє підвищити навантаження по струму.

Стала часу апаратів збільшується в основному за рахунок збільшення маси матеріалу, що бере участь у процесі нагрівання.

Слід зазначити, що при $t = 4T$ перевищення температури досягає $0,98 \tau_y$. Тому при $t \geq 4T$ режим можна вважати режимом тривалого включення.

в) Перемежований і повторно-короткочасний режими роботи. Найбільш загальним є перемежований режим, коли після короткочасного нагрівання апарата величина струму падає і температура апарата знижується (рис. 26).

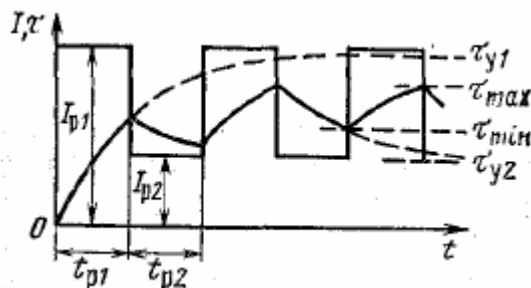


Рис. 26 – Нагрів апарата при повторно-короткочасному режимі роботи

Протягом часу t_{p1} через апарат проходить незмінний струм I_{p1} . Усталене перевищення температури для цього струму дорівнює τ_{y1} . Протягом часу t_{p2} через апарат проходить незмінний струм I_{p2} . Усталене перевищення температури, що відповідає цьому струму, дорівнює τ_{y2} .

Оскільки $I_{p1} > I_{p2}$, то протягом часу t_{p2} апарат охолоджується.

Як мине деякий час, максимальні перевищення температури τ_{\max} і мінімальні перевищення τ_{\min} сусідніх циклів стануть однаковими. Настане так званий **квазістаціонарний** режим. Для цього режиму наприкінці інтервалу t_{p1} перевищення досягає τ_{\max} . Одержимо:

$$\tau_{\max} = \tau_y \left(1 - e^{-t_{p1}/T} \right) + \tau_{\min} e^{-t_{p1}/T}.$$

Наприкінці інтервалу часу t_{p2} апарат досягає перевищення температури τ_{\min} . Можна написати:

$$\tau_{\min} = \tau_{y2} \left(1 - e^{-t_{p2}/T} \right) + \tau_{\max} e^{-t_{p2}/T}.$$

Відносно τ_{\max} , отримаємо:

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_{y1} \left(1 - e^{-t_{p1}/T} \right) + \tau_{y2} \left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}} \right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}.$$

Звичайно τ_{\max} повинне дорівнювати максимальному припустимому перевищенню температури $\tau_{\text{доп.}}$. Виразимо усталені перевищення температури через відповідні струми тривалих режимів:

$$\tau_{y1} = \frac{I_{p1}^2 R}{k_T S};$$

$$\tau_{y2} = \frac{I_{p2}^2 R}{k_T S};$$

$$\tau_{\text{доп.}} = \frac{I_{\text{дл}}^2 R}{k_T S};$$

де $I_{\text{дл}}$ – припустимий еквівалентний струм тривалого режиму. З наведених вище рівнянь:

$$I_{дл} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 \left(1 - e^{-t_{p1}/T}\right) + I_{p2}^2 \left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}}.$$

Окремим випадком перемежованого режиму є **повторно-короткочасний режим**, при якому $I_{p2}=0$.

Відповідно час t_{p2} називається часом паузи t_n . Оскільки $I_{p2} = 0$, то $\tau_{y2} = 0$. Тоді, якщо позначити $I_{p1} = I_{p2}$, матимемо:

$$I_{дл} = I_p \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-\frac{t_p+t_n}{T}}}}.$$

Для характеристики повторно-короткочасного режиму вводиться поняття **тривалість включення ПВ** чи **ПВ %**:

$$ПВ\% = ПВ \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\%.$$

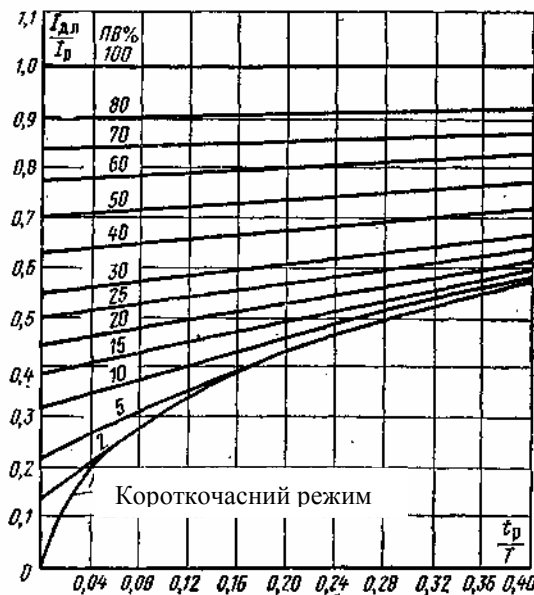


Рис. 27 – Залежність відношення $I_{да}/I_p$ від ПВ% і t_p/T

Сума $t_p + t_n$ — час циклу $t_{ц}$. Коефіцієнт перевантаження по струму знайдемо:

$$\rho = \frac{I_p}{I_{дл}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T} \frac{100\%}{ПВ\%}}}{1 - e^{-t_p/T}}}.$$

При незмінному значенні ПВ% еквівалентний струм залежить від відношення t_p/T . Ця залежність наочно показана кривими на рис. 27. Візьмемо для прикладу ПВ% = 10%. При $t_p/T = 0,04$ відношення $I_{дл}/I_p = 0,34$, а коефіцієнт перевантаження 2,94. Якщо $t_p/T = 0,4$, то $I_{дл}/I_p$ зростає до 0,57, а коефіцієнт p падає до 1,75. Таким чином, при зростанні відношення t_p/T теплове навантаження апарата збільшується, коефіцієнт припустимого перевантаження по струму зменшується.

3.6. НАГРІВАННЯ АПАРАТА ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

У реальних установках струми короткого замикання в 10—20 разів можуть перевищувати струми тривалого режиму. Для зменшення температури провідників при короткому замиканні, полегшення струмоведучих частин тривалість проходження струмів обмежується захисними засобами до 4—5 с. З урахуванням малої тривалості коротких замикань припустима температура при коротких замиканнях значно вище, ніж у тривалому режимі. Так, для мідних провідників з ізоляцією класу А ця припустима температура дорівнює 250° С.

При розрахунку температури елементів апаратів у режимі короткого замикання завдяки малій тривалості цього режиму можна знехтувати теплом, що віддається в зовнішнє середовище, і вважати, що все тепло витрачається на підвищення температури провідника. У цьому разі енергетичний баланс провідника, що має опір R і масу M , виражається рівнянням

$$I^2 R dt = c M d\theta.$$

Через те, що температура може досягати великих значень (300° С), необхідно враховувати зміну як опору R , так і питомої теплоємності c від температури. З достатньою точністю можна вважати, що зміна опору провідника від температури описується лінійним рівнянням:

$$R = k_d \rho_0 \frac{l}{q} (1 + \alpha \theta),$$

де k_d — коефіцієнт додаткових утрат;
 ρ_0 — питома теплоємність при 0°С;
 α — температурний коефіцієнт опору матеріалу;
 q — переріз провідника;
 l — довжина провідника.

Залежність питомої теплоємності від температури можна виразити рівнянням

$$c = c_0 (1 + \beta \theta),$$

де c_0 — питома теплоємність при 0°С;

β — температурний коефіцієнт теплоємності.

Виразимо масу M через щільність γ , переріз q і довжину провідника l :

$$M = \gamma l q.$$

Після підстановки і спрощення матимемо:

$$\frac{I^2}{q^2} dt = \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \theta)}{k_D \rho_0 (1 + \alpha \theta)} d\theta.$$

Зробимо інтегрування правої і лівої частин рівняння:

$$\int_0^{t_{кз}} \frac{I^2}{q^2} dt = \int_{\theta_H}^{\theta_{кз}} \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \theta)}{k_D \rho_0 (1 + \alpha \theta)} d\theta,$$

де $t_{кз}$ — тривалість короткого замикання;

θ_H — температура провідника до початку короткого замикання (звичайно при протіканні тривалого номінального струму);

$\theta_{кз}$ — температура провідника при короткому замиканні до моменту часу $t_{кз}$.

Припустимо, що струм I не змінюється за своїм діючим значенням. Надалі буде показано, що отримані формули можуть бути використані й у випадку, коли діюче значення I змінюється.

У результаті інтегрування одержимо:

$$\frac{I^2}{q^2} t_{кз} = \delta^2 t_{кз} = A_{\theta_{кз}} - A_{\theta_H},$$

де δ — щільність струму;

$A_{\theta_{кз}}$ і A_{θ_H} — значення інтеграла правої частини при верхньому ($\theta_{кз}$) і нижньому (θ_H) межах інтегрування.

q — переріз провідника.

З метою спрощення розрахунків побудовані криві $\theta = f(A_\theta)$ для різних матеріалів (рис. 28). За допомогою цих кривих легко зробити розрахунок на термічну стійкість апарата.

Відповідно до властивостей провідника й ізоляції вибирається припустима температура при короткому замиканні $\theta_{кз}$ і номінальному струмі θ_H . За допомогою кривих на рис. 28 знаходимо $A_{\theta_{кз}}$ і A_{θ_H} , що відповідають температурам $\theta_{кз}$ і θ_H . Знаючи $\delta^2 t$, можна при даних t і I визначити переріз провідника q або при відомих t і q знайти припустимий струм короткого замикання. Якщо відомий припустимий струм I_1 при часі $t_{кз1}$, то припустимий струм при часі $t_{кз2}$ дорівнює:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{t_{к.31}}{t_{к.32}}}.$$

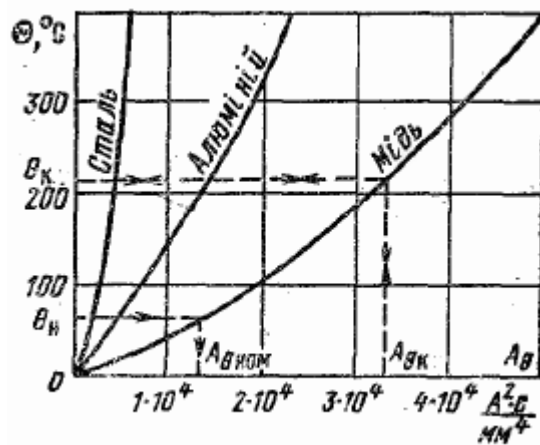


Рис. 28 – Криві для визначення температури провідників при проходженні струму короткого замикання

Рівняння не враховує тепловіддачу в навколишнє середовище, тому ним можна користуватися при часі не більше 10 с.

Якщо використовується матеріал, для якого немає кривих, аналогічних рис. 28, то при $\beta \ll \alpha$ розрахунок термічної стійкості роблять за допомогою рівняння

$$\delta^2 t = \frac{c_0 \gamma}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha \theta_{к.3}}{1 + \alpha \theta_n}.$$

β — температурний коефіцієнт теплоємності;
 α — температурний коефіцієнт опору матеріалу;

Фізичні сталі провідникових матеріалів, що широко застосовуються в апаратах, наведені в [1-3].

При короткому замиканні поблизу генератора через перехідні процеси величина змінної складової струму, що протікає через апарат, змінюється. У цьому разі розрахунок термічної стійкості ведуть по усталеному струму короткого замикання I_∞ .

Час проходження сталого струму I_∞ приймається рівним фіктивному часу t_ϕ .

Фіктивний час t_ϕ — це час, при якому тепло, що виділяється при проходженні сталого струму I_∞ , дорівнює теплу, що виділяється при проходженні реального струму за реальний час протікання.

Фіктивний час для періодичної складової струму короткого замикання $t_{\phi, \text{пер}}$ знаходять за допомогою кривих рис. 29. Для даного генератора

визначають $\beta'' = I''/I_\infty$. (I'' — діюче значення надперехідного струму) і, знаючи дійсний час проходження струму $t_{кз} = t \beta''$, знаходять $t_{ф.пер.}$.

Фіктивний час для аперіодичної складової струму може бути знайдений за спрощеною формулою з [1-8]:

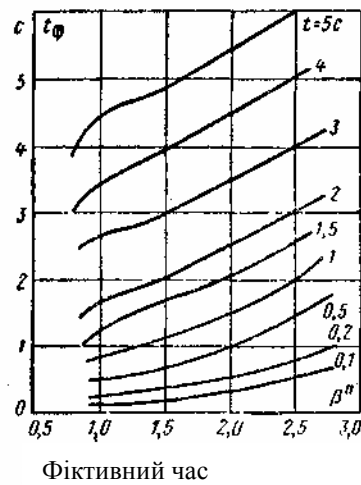


Рис. 29 – До розрахунку фіктивного часу $t_\phi = f(\beta'', t)$

$$t_{ф.пер.} = 0,005(\beta'')^2.$$

Фіктивний час $t_\phi = t_{ф.пер.} + t_{ф.пер.}$.

3.7. ПРИПУСТИМІ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ РІЗНИХ ЧАСТИН АПАРАТІВ ПРИ ТРИВАЛІЙ РОБОТІ І КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ. ТЕРМІЧНА СТІЙКІСТЬ АПАРАТІВ

Граничні температури елементів апаратів визначаються властивостями застосованих провідникових і ізоляційних матеріалів, тривалістю впливу і призначенням апарата.

У ГОСТ 8865-93 [8] наведена нагрівостійкість ізоляційних матеріалів.

Температура елементів апарата в тривалому режимі складається з температури навколишнього середовища θ_0 і перевищення температури: $\theta = \theta_0 + \tau$.

Найбільша температура навколишнього середовища прийнята **+40° С**.

Звичайно апарати розраховують для роботи на висоті не більше 1000 м над рівнем моря. При більшій висоті падає щільність повітря і погіршуються умови охолодження. На висоті 3000 м струмове навантаження знижується на 4%, а при висоті 6000 м — на 10%.

Якщо $\theta_0 > 40^\circ\text{C}$, то струмове навантаження апарата повинне бути знижене таким чином, щоб граничні температури відповідали ДСТ (зменшується припустиме перевищення температури). Припустимий струм при $\theta_0 \neq 40^\circ\text{C}$ визначається формулою

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{н}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_0}{\theta_{\text{доп}} - 40^\circ \text{C}}}.$$

Якщо $\theta_0 < 40^\circ \text{C}$, то струмове навантаження апарата може бути збільшене відповідно до рівняння, але не більше ніж на 20% з таким розрахунком, щоб граничні температури були у відповідності з ДСТ.

Припустимі значення температури нагрівання для різних елементів апаратів наведені в [8].

Шини, що приєднуються до апаратних затискувачів, повинні мати температуру нижче, ніж ці затискувачі, для того, щоб створювати відвід тепла від контактів.

Через те, що тривалість короткого замикання мала (не більше 5 с) і самі замикання відносно нечасті, припустимі температури при короткому замиканні в 2—4 рази вище, ніж при тривалому режимі. Відповідно до ГОСТ 687-70 граничні значення температури при короткому замиканні не повинні перевищувати **200° C** для алюмінієвих провідників. Для провідників з міді і її сплавів, що стикаються з органічною ізоляцією або з маслом – **250 °C**, для провідників з міді і її сплавів, що не стикаються з органічною ізоляцією або з маслом – **300° C**.

Струмоведучі частини, розраховані й обрані для тривалого режиму, повинні бути перевірені на термічну стійкість при короткому замиканні за рівняннями і кривими на рис. 29. При розрахунку беруть найбільш важкий випадок — до моменту початку короткого замикання елемент апарата нагрітий тривалим струмом до гранично припустимої температури цього режиму.

Оскільки струм термічної стійкості залежить від тривалості його проходження, то термічна стійкість відноситься до певного часу. В Україні струм термічної стійкості звичайно відносять до часу 1; 3; 5 і 10 с у залежності від параметрів апарата (ГОСТ 687-70). Зв'язок між струмами термічної стійкості для різних значень часу згідно виражається рівністю

$$I_1^2 \cdot 1 = I_3^2 \cdot 3 = I_5^2 \cdot 5 = I_{10}^2 \cdot 10$$

Тема 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТИ

4.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Електричним контактом називається стикання двох електричних провідників, що створює умови прохідності струму, а також місце такого стикання. Дотичні провідники називаються **контактами** або **контакт-деталлями**.

Говорячи про електричний контакт, слід розрізняти умовну і фізичну площі контакту. Як би ретельно не були відшліфовані контактні поверхні, вони все таки матимуть мікроскопічні горбики й шорсткості. Тому фізично дві поверхні контактуватимуть не всією умовною площею робочої поверхні контакту – деталі (рис. 30, в), а тільки окремими мікроскопічними площадками (рис. 30, д).

Кількість контактних площадок і їх розташування залежать від геометричних форм контактуючих деталей.

За формою контакту розрізняють три типи контактів: **точковий**, **лінійний**, **поверхневий**.

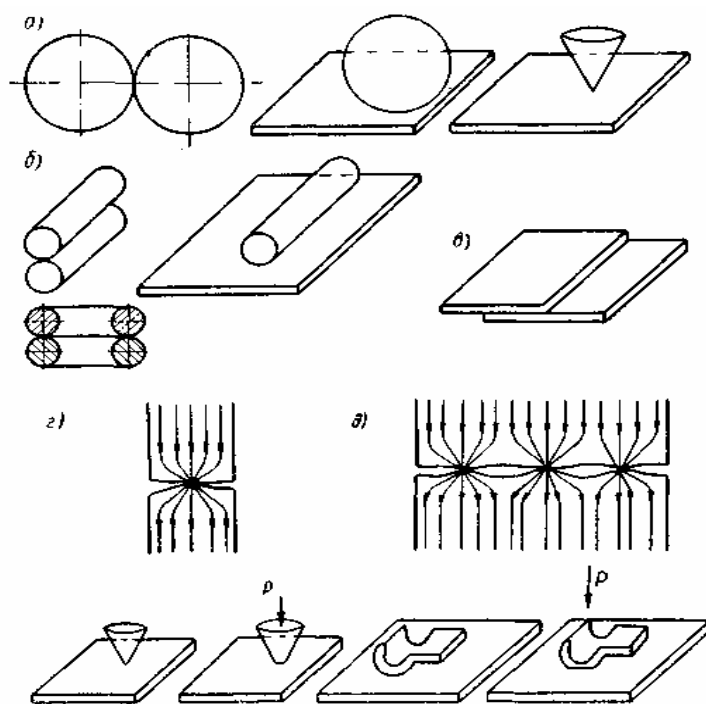


Рис.30 – Типи контактів, умовна і фізична площі контактування

Точковий – контакт тільки в одній площадці - точці (рис. 30, а і г), наприклад, сфера – сфера, сфера – площина, конус – площина і т.п. Тут умовна і фізична картини контакту співпадають.

Лінійний – умовний контакт деталей відбувається по лінії (рис. 30, б і д), наприклад, циліндр – циліндр (по твірній), циліндр – площина, виток – виток і т.п. Фізична картина контакту представлена рядом площадок (мінімум

дві), розташованих на лінії.

Поверхневий – умовний контакт відбувається по поверхні (рис. 30, в), фізичний – у ряді площадок (мінімум три), розташованих на цій поверхні.

Розміри площадок контакту пропорційні силі, що стискає деталі, і залежать від опору зім'яттю матеріалу деталей. Якщо дві деталі контактують в одній площадці, то її розмір у першому наближенні

$$q = P/\sigma,$$

де P - сила, що стискає деталі; σ - тимчасовий опір матеріалу тому, що зім'яттю (табл. 4-1) [1].

Таблиця 4.1

Матеріал	σ (н/см ²)	Матеріал	σ (н/см ²)
Мідь тверда	52 000	Золото	53 000
... м'яка	39 000	Графіт	13 200
Алюміній	29 000	Молібден	169 000
Срібло	31 000	Нікель	225 000
Платина	78 000	Вісмут	3 600
Цинк	43 000	Ванадій	372 000
Свинець	2 300	Сурма	10 600
Олово	4 500	Тантал	90 000

Якщо деталі контактують в m площадках, то розмір кожної визначиться тим же рівнянням, а розмір загальної площі буде дорівнювати сумі розмірів окремих площадок. У першому наближенні силу стиснення для кожної площадки можна вважати рівною

$$P' = P/m.$$

Співвідношення з достатнім наближенням справедливо до деякого **значення** сили P . Із зростанням сили стиснення зростання розмірів площадок стикання сповільнюється, починається усадка всієї площі контакту. Звідси виходить, що збільшення сили натиснення контактів вище певної межі не доцільне.

Тип контакту визначається його призначенням, величинами струму і контактного натиснення, конструкцією контактної вузла і всього апарата. При цьому слід завжди мати на увазі, що багатоточкове контактування забезпечує надійніший контакт.

4.2. ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР КОНТАКТУ

У зоні переходу струму з одного тіла в інше має місце відносно великий

електричний опір, названий *перехідним опором контакту*.

Електричне контактування – вельми складне явище. Контактні поверхні завжди мають деяку шорсткість і, як правило, завжди покриті плівками, які утворюються під впливом кисню повітря, озону, азоту та інших хімічних реагентів. Плівки мають товщину приблизно до 10^{-6} см і питомий опір $\rho = 10^5$ Ом-см. Металеве контактування здійснюється не по всій поверхні, а лише в небагатьох точках. Плівка, що є на поверхні металу, може бути в одних випадках продавлена силою, що стискає контакти, в інших – пробита під впливом різниці електричних потенціалів. У місці пробою може утворитися металевий перешийок, що проводить електричний струм.

Явище пробою плівки при деякій напрузі називається фрітінгом. Воно полягає в тому, що при деякому (пороговому) значенні напруги, залежному від вигляду і товщини плівки, опір її різко падає. Відбувається електричний пробій плівки, що завершується утворенням в ній тонкого металевого провідника, який може залишитися після зняття напруги.

У місцях чисто металевого контактування розвиваються великі сили міжмолекулярних і міжатомних зв'язків. Чисто металеве контактування – явище рідкісне. Такий контакт при значній площі стикання поверхонь неможливо було б розірвати тими силами, які реально існують в електричних апаратах. Ймовірно, чисто металеве контактування можемо спостерігатися лише в місцях дуже вузьких металевих перешийків, які можуть утворитися при пробіі плівок і розвиватися, наприклад, під впливом електростатичних сил. Явища електричного контактування остаточно ще не вивчені.

З уточненнями на підставі дослідних даних величина перехідного опору визначається виразом

$$R_{\text{пер}} = \frac{\varepsilon}{p^n} \quad (4.1)$$

де ε – деяка величина, що залежить від матеріалу і форми контакту, способу обробки і стану контактної поверхні; P – сила, що стискає контакти; n – показник ступеня, що характеризує число точок стикання.

Із збільшенням числа точок стикання двох контактів перехідний опір зменшується. У виразі (4.1) показник ступеня приймають: для одноточкового контакту $n = 0,5$, для багатоточкових $n = 0,7-1$, для лінійного контакту $n = 0,7-0,8$, для поверхневого $n = 1$.

Значення величини ε залежать від стану поверхні контактів, характеру їх обробки і особливо від ступеня окислення. Для свіжих, не окислених і нормально оброблених одноточкових контактів (обробка на верстаті, остаточна обробка шліфувальним напилком і змащення вазеліном) можна приймати наступні середні значення ε в Ом \cdot Н^{0.5} [1]:

Мідь..... $1,0 \cdot 10^{-3}$	Алюміній..... $1,6 \cdot 10^{-3}$
Срібло..... $0,5 \cdot 10^{-3}$	Латунь..... $6,7 \cdot 10^{-3}$
Олово..... $5 \cdot 10^{-3}$	Сталь..... $76 \cdot 10^{-3}$

Залежність перехідного опору від контактного натиснення відповідно до рівняння представлена на рис. 31, а. Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натиснення, крива 2 – зниженню натиснення. Різний хід кривих пояснюється наявністю залишкових деформацій окремих горбиків, по яких відбувалося стикання.

Слід зазначити, що при одному й тому ж натисненні перехідний опір одного і того ж контакту при кожному замиканні може бути різним і відрізнятися в досить широких межах: у великих при малих натисненнях і в менших при великих натисненнях (>100 н). Пояснюється це тим, що кількість і розмір площадок контакту при кожному замиканні можуть бути різними. Величина перехідного опору залежно від натиснення практично виражається не якоюсь кривій, а областю, обмеженою двома кривими, як це показано на рис. 31, б.

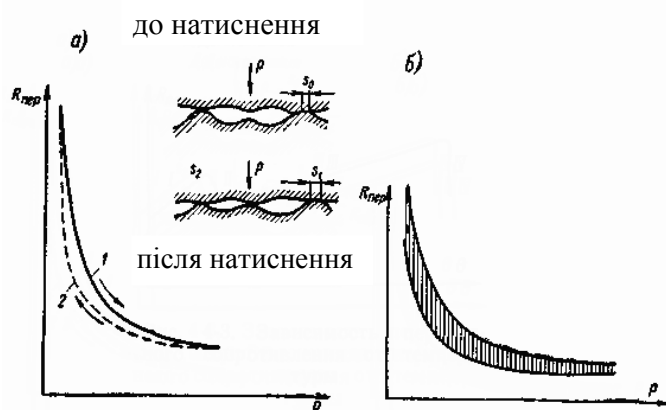


Рис. 31 – Залежність перехідного опору контакту від сили натиснення.

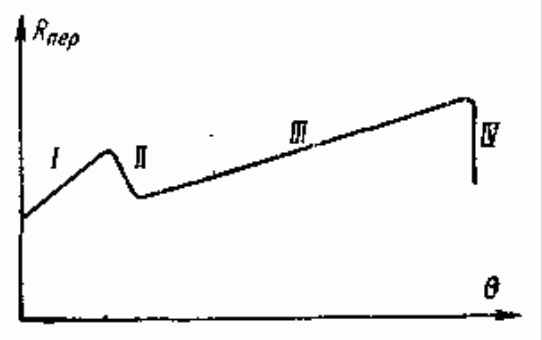


Рис. 32 – Залежність перехідного опору контакту від температури

Залежність перехідного опору від температури. Як вказано вище, перехідний опір контакту є опір металу провідника, тому він повинен у тій же мірі залежати від температури. Проте із збільшенням температури міняється структура горбиків і площадок стикання за рахунок зміни величини питомого опору зім'яттю σ . Тому температурний коефіцієнт тут буде меншим. Для міді

$$R_{\text{ПЕР.Г}} = R_{\text{ПЕР.ХОЛ}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right).$$

де α – температурний коефіцієнт опору.

Із зростанням температури перехідний опір спочатку зростає (ділянка I кривої на рис. 32). Потім при деякій температурі (для міді й срібла при 200-300° С) відбувається різке падіння механічних властивостей (твердості, опору розриву) матеріалу. При тому ж натисненні збільшується контактна

площадка, перехідний опір (ділянка II) різко падає. Надалі (ділянка III) він знову зростає лінійно із зростанням температури, при температурі плавлення матеріалу контакти зварюються, перехідний опір падає майже до нуля (ділянка IV).

Залежність перехідного опору від стану контактної поверхні. Шліфівка поверхонь не зменшує, а, навпаки, збільшує перехідний опір порівняно з обробкою напилком. При шліфуванні горбики на поверхні стають пологішими і зім'яття їх ускладнюється.

Залежність перехідного опору від властивостей матеріалу контакту. Перехідний опір надзвичайно чутливий до окислення поверхні з огляду на те, що оксиди багатьох металів (зокрема, мідь) є поганими провідниками. У мідних відкритих контактах унаслідок їх окислення з часом перехідний опір може зрости в тисячі разів. Сказане можна проілюструвати на прикладі (табл. 4.2) [1].

Таблиця 4.2

Матеріали контактів	Час окислення у днях при $\Theta = 70^{\circ}\text{C}$	Зростання перехідного опору контактів
Срібло – срібло	22	У 5 разів
Мідь – мідь	36	У 150000 разів
Мідь – латунь	38	У 1755 разів
Латунь – латунь	46	У 1820 разів
Сталь – сталь	57	У 900 разів

У замкнутих мідних контактів за тих же умов перехідний опір може зрости в 10-100 разів. Окислення поверхні контактів відбувається під впливом кисню повітря. У замкнутих контактів доступ повітря до контактних площадок утруднений, окислення їх йде, зважаючи на це, повільніше. Із зростанням температури окислення контактів відбувається інтенсивніше.

Оксиди срібла мають електропровідність, близьку до електропровідності чистого срібла. При підвищених температурах оксиди срібла руйнуються. Тому перехідний опір контактів із срібла, а також із срібловмісних металокерамік практично не змінюється з часом. Він навіть може знизитися внаслідок повільної пластичної деформації матеріалу в контактних площадках.

Зростання перехідного опору може призвести до неприпустимого збільшення температури контактів. Для мідних контактів необхідно вживати заходи боротьби з окисленням їх робочих поверхонь.

У з'єднаннях, що не розмикаються, проводять антикорозійні покриття робочих поверхонь – сріблять, лудять, кадміюють, іноді нікелюють і цинкують. Застосовують покриття робочих поверхонь нейтральним мастилом (наприклад, вазеліном) після зачистки їх напилком. Після збірки контактного з'єднання шви повинні бути закладені (загерметизовані) асфальтовим або

емалевим лаком.

Контакти, що комутують, які тривалий час працюють під струмом, не вимикаючись, виконують, як правило, із срібла або металокерамік на основі срібла. Для мідних контактів знижується величина струму навантаження порівняно з допустимим для 8-годинного режиму. Тим самим знижується нагрів контактів і інтенсивність їх окислення. Якщо це допустимо за технологічними умовами, рекомендується апарати з мідними контактами періодично, після 8-12 годин роботи, відключати 2-3 рази під струмом і знову включати. Виникаюча при відключенні дуга спалює оксиди, і перехідний опір знижується. У багатьох апаратах (контакторах, автоматичних вимикачах) кінематична схема передбачає при замиканні деяке прослизання одного контакту по іншому. Окисна плівка, що утворилася, при цьому стирається.

Матеріали більшої твердості мають більший перехідний опір і вимагають більшого контактного натиснення. Чим вищі електропровідність і теплопровідність матеріалу, тим нижче перехідний опір.

Вплив величини умовної площі контактування. Із збільшенням площі робочої поверхні контакту-деталі зростає число точок стикання, а від цього збільшується значення показника ступеня p в рівнянні (4-1). Проте безмежне збільшення умовної площі контактування недоцільно, оскільки p швидко досягає значення, близького до одиниці, а більше одиниці p не буває. Перехідний опір контакту мало залежить від величини умовної площі контактування. Все ж таки із збільшенням номінального струму треба збільшувати і зовнішню поверхню контакту, оскільки із збільшенням струму ростуть втрати і для їх розсіяння потрібна велика поверхня.

4.3. ТЕМПЕРАТУРА КОНТАКТНОЇ ПЛОЩАДКИ

При проходженні струму в контактній площадці через наявність перехідного опору виділятиметься енергія $I^2 R_{\text{пер}} dt$. Оскільки ця енергія набагато більше енергії $I^2 R dt$, що виділяється в матеріалі контакту, а тепловіддача в навколишнє середовище здійснюється з поверхні контакту (рис. 33), то температура контактної площадки буде вища за середню температуру контакту. Перевищення температури контактної площадки над температурою тепловіддавальної поверхні контакту буде

$$\theta_k - \theta_{\text{п}} = \tau_k = \frac{I^2 \rho \pi \sigma}{32 \lambda P}, \quad (4.2)$$

де ρ – питомий опір матеріалу контакту;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу контакту;

σ – часовий опір зім'яттю;

P – сила контактного натискання.

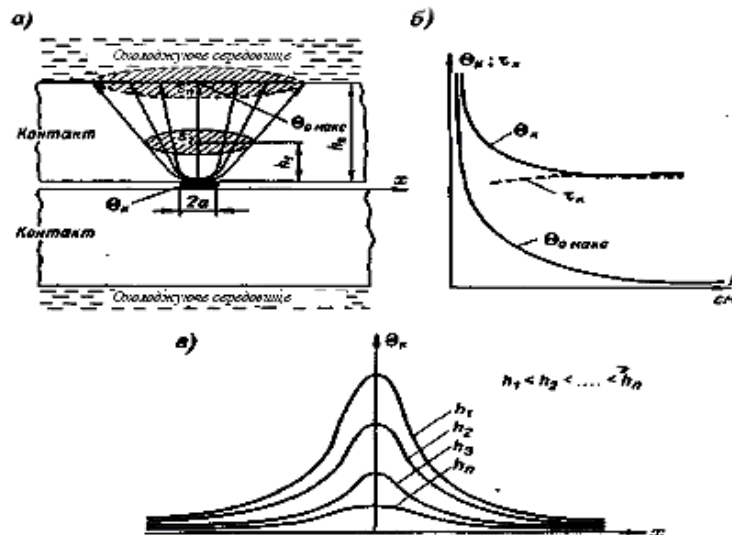


Рис. 33 – Схема тепловідведення і розподілу температур в районі контактування

коли прийняти, що перехідний опір контакту

$$R_{\text{пер}} = \rho / 2a, q = P / \sigma = \pi a^2$$

де a – радіус контактної площадки (вважаємо, що то рівняння (4.2) зводиться до вигляду:

$$\tau_k = \frac{1}{8} \cdot \frac{U_{\text{пер}}^2}{\lambda \rho},$$

де $U_{\text{пер}}$ – падіння напруги в перехідному опорі контакту.

На рис. 34 наведені криві, що виражають згідно із залежністю τ_k контактної площадки срібних і мідних контактів від падіння напруги $U_{\text{мр}}$ в них.

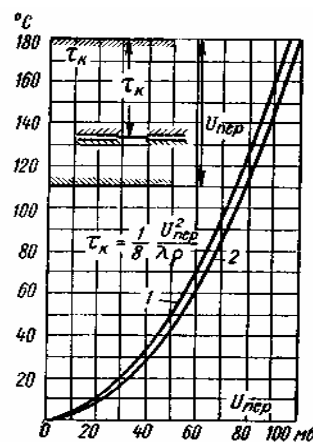


Рис. 34 – Залежність перевищення температури контактної площадки від падіння напруги $U_{\text{мр}}$ в контактному з'єднанні. 1 – срібло, 2 – мідь.

При природному охолодженні падіння напруги в перехідному опорі контакту при номінальному струмі звичайно 10-20 МВ. Перевищення температури контактної площадки над середньою температурою контакту при цьому складає декілька градусів (не більше 10°C) і при нормуванні температури контакту до уваги не береться.

4.4. ОСНОВНІ КОНСТРУКЦІЇ КОНТАКТІВ

Контакти, що не розмикаються. Контакти, що не розмикаються, застосовують для жорсткого з'єднання між собою окремих струмоведучих частин. Конструкція повинна забезпечувати надійне притиснення контактних поверхонь, що при експлуатації не послаблюється, і мінімальний перехідний опір.

Характерні види з'єднання плоских провідників (шин) наведені на рис. 35. Шини вигідніше скріплювати декількома меншими болтами (рис. 35, б), ніж одним великим (рис. 35, а). У першому випадку забезпечується більше число точок стикання, ніж у другому. З'єднання за рис. 35, в забезпечує більше число точок стикання, ніж з'єднання за рис. 35, б. При стягненні накладками (рис. 35, г) перехідний опір нижчий, ніж при стягненні наскрізними болтами. З'єднання пакетів шин рекомендується виконувати за рис. 35, д, де число точок стикання приблизно в три рази більше і умови охолодження кращі, ніж при з'єднанні за рис. 35, е.

Круглі провідники можуть з'єднуватися між собою і з плоскими провідниками такими способами: кінці провідників розплющують або забезпечують наконечниками, які можуть напаяватися, приварюватися або щільно обтискатися. При струмах до декількох десятків ампер кінець провідника може бути згорнутий у вигляді кільця (петлі) і затиснутий болтом. З'єднання може бути здійснено за допомогою концентричного затиску. Останнє з'єднання складне, дороге і застосовується рідко.

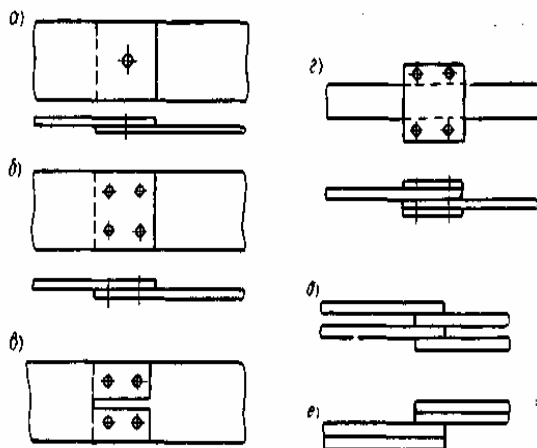


Рис. 35 – Болтові з'єднання шин

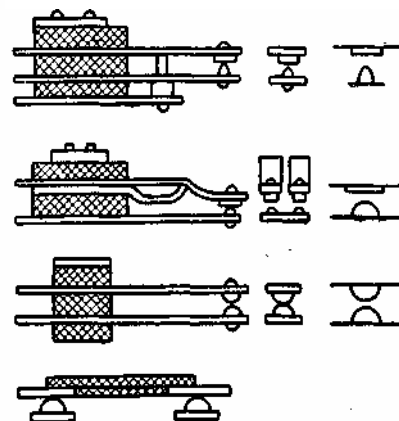


Рис. 36 – Комутуючі контакти на малі струми

Комутуючі контакти. Такі контакти є основним елементом комутаційних апаратів. У контактах на малі струми (до декількох ампер) прагнуть незалежно від конструктивного виконання мати одноточечне контактування, щоб при малих натисненнях одержати відносно високий питомий тиск у контактній точці. Приклади конструктивного виконання контактів на малі струми наведені на рис.36.

При скільки-небудь значних струмах конструкція повинна забезпечувати багатоточковий контакт.

Контактні вузли на середні й великі струми можуть бути підрозділені на важільні, місткові, врубні, роликові, торцеві, розеткові і можуть виконуватися одно- і багатоступінчастими.

В одноступінчастому контакті контактна пара служить як для тривалого проведення струму у включеному положенні, так і для розриву дуги при розмиканні.

У багатьох апаратах до контактів ставляться суперечливі вимоги. Так, в автоматичних вимикачах контакти повинні забезпечувати тривале протікання номінальних струмів у включеному положенні, з одного боку, і відключення без пошкодження великих струмів короткого замикання, з іншого. Для задоволення першої вимоги контакти повинні мати якомога менший перехідний опір, що не змінюється при окисленні поверхні. Для задоволення другої вимоги слід застосовувати дугостійкі контактні матеріали, що мають, як правило, високі перехідні опори і не придатні, зважаючи на окислення, для тривалого проведення струму. Доводиться застосовувати багатоступінчасті контактні системи з головних і дугогасних контактів, що включаються паралельно. Головні контакти виконують з срібла і служать для тривалого проведення струму, дугогасні виконують з дугостійких матеріалів і вони приймають на себе весь тягар замикання і розмикання. Замикаються контакти в такій послідовності: спочатку дугогасні, а потім головні. При розмиканні черговість зворотна: спочатку розмикаються головні контакти, розриву ланцюга не відбувається, оскільки весь струм переходить в дугогасні контакти; а потім розмикаються дугогасні, на яких і виникає електрична дуга.

Іноді застосовують систему з трьох паралельних контактів: головних, проміжних і дугогасних. Проміжні контакти служать для полегшення переходу струму з дугогасних у головні (при замиканні) і назад (при розмиканні).

Важільні контакти (рис. 37) застосовують в апаратах з поворотною рухомою системою. Як правило, осі обертання контакту О1 і рухомої системи О2 не співпадають. Крім того, контакти стискаються раніше, ніж рухома система досягає кінцевого положення. Внаслідок цього при замиканні й розмиканні відбувається перекочування і прослизання рухомого контакту по нерухомому, в результаті початкова точка дотику 1 при замиканні, вона ж остання точка дотику і точка виникнення дуги при розмиканні, виявляється зміщеною по відношенню до точки 2 кінцеве торкання контактів.

Таким чином, поверхні, що забезпечують тривале проведення струму і

що визначають перехідний опір контакту, віддалені від місця виникнення дуги. Прослизання контактів при достатньому контактному натисненні призводить до стирання окисної плівки і бруду з поверхні контакту, тобто до самоочищення контактів, це дозволяє застосовувати мідь як контактний матеріал.

Прослизання при тій шорсткості, яку звичайно мають поверхні контактів (особливо ті, що працювали), викликає додаткову вібрацію контактів при їх замиканні, а, отже, і їх підвищений знос. Зважаючи на це з'явилася тенденція виключати або зводити до мінімуму прослизання, зберігаючи перекочування.

Для того, щоб рухомий контакт міг перекочуватися по нерухомому, центр обертання першого при переміщенні по контактній поверхні другого повинен описувати розгортку кола. Радіус кривизни нерухомого контакту (рис. 37, г) може бути обчислений з наступного наближеного рівняння:

$$r = \frac{c(2a - c)}{2b},$$

де c – довжина дуги АВ від початкової точки контакту А до кінцевої В; a – відстань від центру обертання рухомого контакту до точки А; b – відстань переміщення точки обертання рухомого контакту; a , b , c задаються конструктивно.

Відмова від прослизання вимагає підвищення контактного натиснення для забезпечення роботи апарату в тривалому й переривисто-тривалому режимах. При повній відсутності прослизання і недостатньо високому натисненні слід чекати високого перегріву мідних контактів за рахунок поступового окислення кінцевої контактної точки.

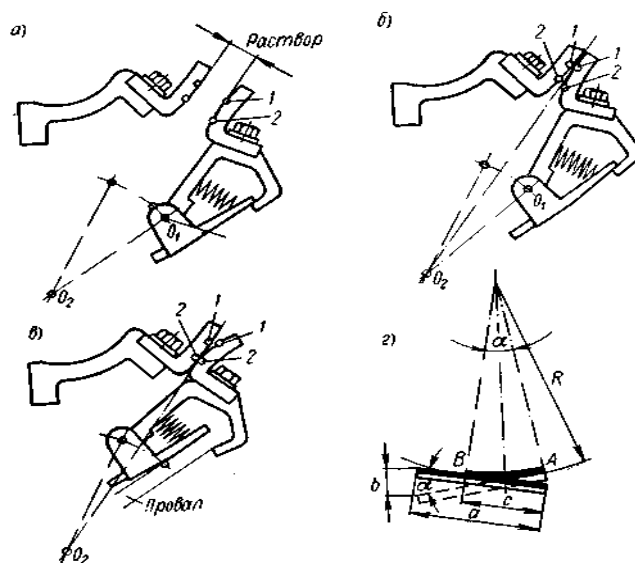


Рис. 37 – Важільні контакти:
а, б, с – кінематика руху; г – визначення радіуса кривини

Останніми роками знаходять застосування контактні системи важелів, в яких відсутні як перекочування, так і прослизання. Досягається це поєднанням осі обертання контакту з віссю обертання рухомої системи. При великій частоті розмикань, коли контактні точки часто очищаються від оксидів електричною дугою, що виникає при відключенні, тут можливе застосування мідних контактів. При малій частоті розмикань мідні контакти унаслідок окислення перегріватимуться, в цьому разі потрібні контакти із срібла або композицій на базі срібла.

Робочі поверхні важільних контактів виконують головним чином у вигляді: площина – циліндр, циліндр – циліндр.

Важільні контакти вимагають гнучкого зв'язку для приєднання до струмопідводу, але гнучкий зв'язок у ряді випадків є слабким місцем контактної системи. Його важко здійснити на великі струми, механічна зносостійкість його виявляється нижчою, ніж інших деталей.

Місткові контакти (рис. 38, а) застосовують переважно в апаратах з прямоходовою рухомою системою. Гнучкий зв'язок відсутній, що є перевагою конструкції, зате потрібне подвоєне контактне натиснення порівняно з важелями, оскільки число перехідних контактів подвоюється. У місткових контактах теоретично перекочування і прослизання відсутні. Тому мідні контакти тут не застосовують, а виконують контакти із срібла або металокераміки на базі срібла. Робочі поверхні виконують у вигляді: площина – площина, площина – циліндр, циліндр – циліндр, площина – сфера, сфера – сфера (при малих струмах).

Місткові контакти можуть застосовуватися і при поворотних рухомих системах. Працюють вони тут подібно до важільних контактів.

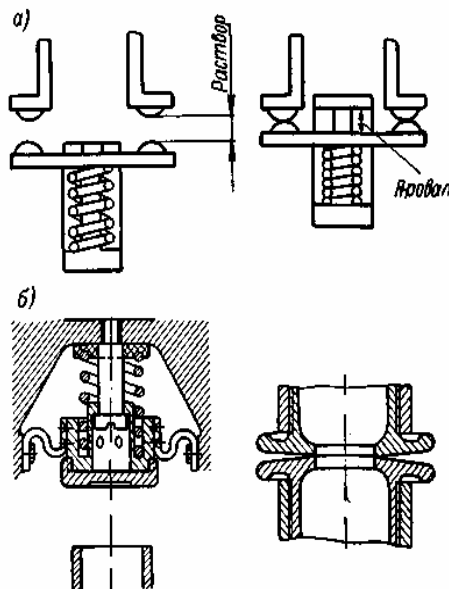


Рис. 38 – Місткові (а) і торцеві (б) контакти.

Врубні контакти (рис. 39). Найпростіші з них на невеликі струми (рис. 39, а, б, в) складаються з нерухомого контактної стояка 1, в який входить рухомий контактний ніж 2. Натиснення здійснюється за рахунок пружних

властивостей матеріалу стояків (твердотягнута мідь, спеціальна бронза), яким надається відповідна форма. При перегріві, а також при частих включеннях пружинисті властивості губок ослабляються і контакт порушується. Для усунення вказаного недоліку у врубних контактах на великі струми для отримання вищих і стійкіших натиснень застосовують сталеві пружини 3 (рис. 39, г).

У конструкціях, показаних на рис. 39, а, б, в, стикання відбувається по поверхні і невеликий перекус контактних поверхонь викликає різке збільшення перехідного опору.

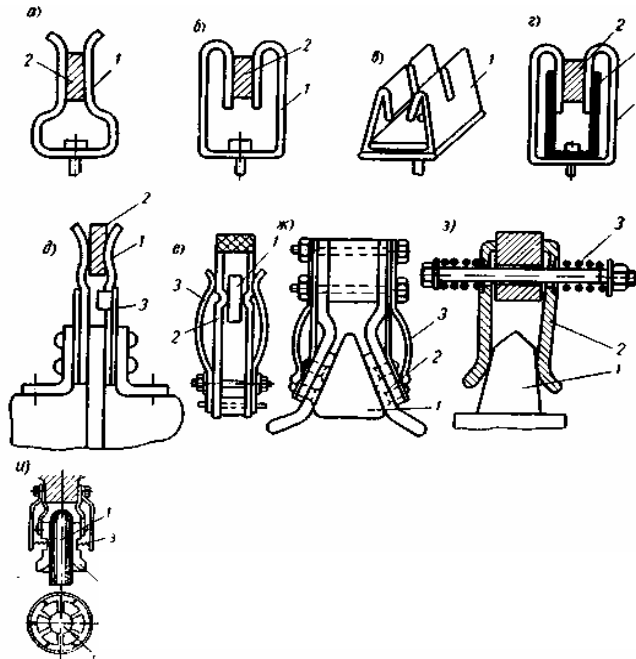


Рис. 39 – Врубні і розеточні контакти.

У контактах на рис. 39, а стикання відбувається по лінії. При тому ж натисненні тут досягається більший питомий тиск, ніж при поверхневому контакті, і менший перехідний опір. Але і ця конструкція чутлива до перекосів контактної ножа. Більш досконалою є контактна система, зображена на рис. 39, е. Тут нерухомий контакт охоплюється рухомими контактними ножами 2, що мають циліндрові виступи. Натиснення здійснюється сталевими пружинами 3. При практично можливих перекосах лінійний контакт у цій конструкції не порушується.

Розглянуті конструкції широко застосовують в рубильниках, перемикачах, плавких запобіжниках.

У високовольтних вимикачах застосовуються контакти ламельні врубні (рис. 39, ж і з). Рухомий контакт тут виконують з окремих ламелій, їх може бути декілька пар, нерухомий виконують клиноподібним. Рухома система прямоходова. Ламелі можуть бути такими, що несамовстановлюються (рис. 39, ж) або самовстановлюються (рис. 39, з). У конструкції, що самовстановлюється, ламель може завжди прийняти положення, що забезпечує не менше двох контактних точок. Така конструкція досконаліша і

дає при рівних натисненнях менший перехідний опір. Розглянуті контакти можуть виконуватися на дуже великі струми шляхом паралельного приєднання будь-якої кількості пар ламелей.

Розеткові контакти (рис. 39, и). Вони складаються з контактної стрижня 1 (рухомий контакт) і ряду сегментів 2 з пружинами 3 (ламелей), що створюють нерухомий контакт. Розеткові контакти застосовують переважно як головні.

Врубні й розеткові конструкції не можуть відключати скільки-небудь значні струми. Виникаюча при цьому дуга порушує контактні поверхні. На них з'являються оплавлення, контакт порушується. Крім того, різко зростає зусилля, необхідне для включення і виключення. Для відключення скільки-небудь значних струмів застосовують паралельне включення дугогасних контактів.

У роликівих контактах (рис. 40) між двома нерухомими контактами 1 зачухується рухомий ролик 2, який перемикає нерухомі контакти. Ролик може мати циліндрову або сферичну поверхню. Відповідно до цього матимемо лінійний або точковий контакт. Шляхом паралельного включення роликів утворюється багатоточковий контакт на великі струми. Роликовий контакт застосовують як головний. Для відключення струму через обгорання роликів він непридатний.

Торцові контакти (див. рис. 38, б) виконують у вигляді суцільних металевих стрижнів або порожнистих труб. Контактні поверхні можуть бути плоскими, сферичними або одна плоска, а інша сферична.

Контакти мають великий перехідний опір і вимагають чималого натиснення, тому застосування їх на великі номінальні струми утруднено. Вони використовуються переважно як дугогасні. Торцові контакти вимагають гнучкого зв'язку, роликового або іншого струмопідводу.

Ковзні контакти. Ці конструкції здійснюють передачу струму без обриву ланцюга з нерухомої контактної деталі на рухому. Вони можуть виконуватися з важільними, містковими, роликовими та іншими контактами. В апаратах низької напруги ковзні з'єднання широко застосовують в реостатах і контролерах.

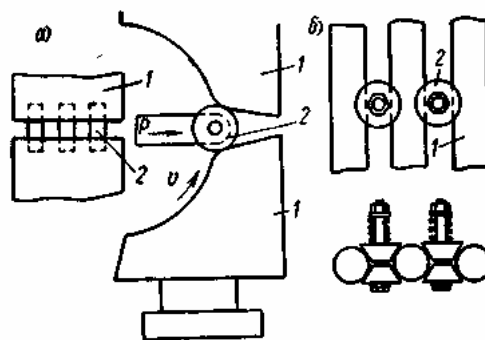


Рис. 40 – Роликові контакти

4.5. ПАРАМЕТРИ КОНТАКТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розхил контактів є найкоротшою відстанню між розімкненими контактними поверхнями рухомого і нерухомого контактів (див. рис. 37 і 38). Величину розхилу контактів звичайно вибирають з умови гасіння малих струмів.

При роботі контакти зношуються. Щоб забезпечити їх надійне стикання на тривалий термін, кінематику апарату виконують таким чином, що контакти стикаються раніше, ніж рухома система (система переміщення рухомих контактів) доходить до упору. Контакт кріпиться до рухомої системи через пружину. Завдяки цьому після стикання з нерухомим контактом рухомий зупиняється, а рухома система просувається ще вперед до упору, стискаючи при цьому додатково контактну пружину. Таким чином, якщо при замкнутому положенні рухомої системи прибрати нерухомо закріплений контакт, то рухомий контакт зміститься на деяку відстань, названу провалом.

У прямоходових контактних конструкціях (див. рис. 38) провал вимірюють безпосередньо, а в апаратах з поворотною системою (див. рис. 37) величину провалу визначають величиною проміжка d , контролюючого провал. Величина провалу визначає величину запасу на знос контактів при заданому числі спрацьовувань. За інших рівних умов більший провал забезпечує вищу зносостійкість, тобто більший термін служби. Але більший провал, як правило, вимагає і потужнішої магнітної системи.

Контактне натиснення – сила, що стискає контакти в місці їх стикання. Розрізняють початкове натиснення P_0 у момент початкового стикання контактів, коли провал дорівнює нулю, і кінцеве натиснення P_k при повному провалі:

$$P_0 = c \Delta l_1; \quad P_k = P_0 + c \Delta l_2,$$

де c – жорсткість контактної пружини, тобто величина сили в ньютонках, необхідної для стиснення пружини на 1 см; Δl_1 – величина первинного стиснення пружини; Δl_2 – величина додаткового стиснення пружини при виборі провалу.

Із зносом контактів зменшується провал, а, отже, і додаткове стиснення пружини. Кінцеве натиснення наближається до початкового. Таким чином, початкове натиснення є основною величиною, при якій має бути забезпечена надійна робота апарату.

4.6. ЗНОС КОНТАКТІВ

Під зносом контактів розуміють руйнування робочої поверхні комутуючого контакту, що приводить до зміни їх форми, розміру, маси й до зменшення провалу.

Знос під впливом різного роду механічних чинників (удар, тертя, перекочування) називається механічним зносом. Якісні й кількісні сторони його визначаються законами механіки, металознавства і опору матеріалів і

тут не розглядаються.

Знос, що відбувається під дією електричних чинників, називається електричним зносом. Знос має місце як при розмиканні, так і при замиканні. Розмикання ланцюга супроводжується появою дугового або іскрового розряду на розімкнутих контактах. При відключенні скільки-небудь значних струмів електричній дузі передують поява контактної перешийки з розплавленого металу. Під дією високої температури дуги або іскри частина металу перешийки випаровується, частина розбризкується і викидається з проміжку між контактами, частина металу переноситься з одного контакту на інший.

Явище, що полягає в направленому перенесенні металу з одного електрода на інший під дією електричного розряду, який виникає між електродами, називається електричною ерозією. При дуговому розряді має місце перенесення металу з катода на анод, при іскровому розряді – навпаки, з анода на катод. У результаті на одному контакті утворюється западина, на другому – відповідний їй горбик (рис. 41). При малих розхилах це може привести до зварювання контактів унаслідок їх стикання в розімкненому стані.

Розміри ерозії ростуть із зростанням струму, напруги і часу горіння дуги, а також залежать від матеріалу контактів. Деякі матеріали, наприклад срібло, золото, які стійкі проти корозії, сильно піддаються ерозії; інші, наприклад мідь, вольфрам, молібден, є більш ерозіостійкими.

Зменшення ерозії може бути досягнуте за рахунок швидкого переміщення дуги із зони її виникнення, при цьому зона буде менше розігріта, буде менше розплавлено металу, а, отже, і менше ерозія.

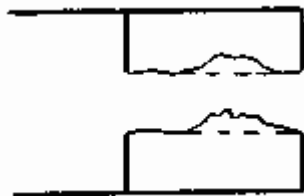


Рис. 41 – Ерозія контактів (штриховою лінією показана початкова форма)

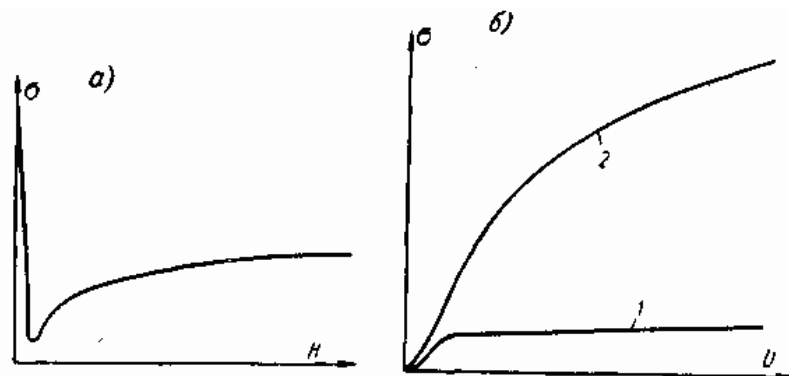


Рис. 42 – Залежність зносу контактів:
а – від напруженості магнітного поля; б – від напруги

Природно, що застосування ерозіостійких матеріалів і металокераміки також є дієвим методом зниження ерозії.

Для зниження ерозії при малих струмах може застосовуватися шунтування контакту ємністю. У цьому разі при розмиканні контакту або зовсім не виникає електричний розряд, або величина розряду різко знижується, оскільки вся енергія дуги або її частина йде на заряд конденсатора.

Проте при значних ємностях у процесі замикання, коли між контактами залишається ще деякий проміжок, може відбутися пробій і розряд зарядженого конденсатора через цей проміжок і, як наслідок, зварювання контактів.

4.7. ЗНОС КОНТАКТІВ ПРИ РОЗМИКАННІ

Знос контактів при розмиканні є наслідком дугового розряду і залежить від багатьох змінних чинників. До теперішнього часу немає аналітичного виразу для розрахунку величини зносу. Зважаючи на це наведемо деякі залежності, одержані дослідним шляхом.

Залежність зносу від числа розмикань. Знос контактів при даній напруженості магнітного поля прямо пропорційний числу розмикань. Якщо величина зносу при одному розмиканні дорівнює s , то за n розмикань величина зносу

$$\sigma = sn.$$

Залежність зносу від напруженості магнітного поля. Ця залежність характеризується кривою на рис. 42, а. При малих напруженостях дуга тривалий час знаходиться на одних і тих же опорних точках, що і приводить до зносу контактів. Із зростанням напруженості росте швидкість руху опорних точок дуги, контакти менше нагріваються і оплавляються, знос знижується.

Проте при деякій напруженості магнітного поля починається нове явище, що міняє картину процесу.

Як вже наголошувалося, появі дуги на контактах, що розходяться, передують містки з розплавленого металу. Із зростанням напруженості зростають електродинамічні сили взаємодії струму із зовнішнім магнітним полем. Ці сили починають викидати з щілини між контактами розплавлений метал містка. Знос зростає. Коли електродинамічні сили досягають такого значення, що викидають весь розплавлений метал з проміжку між контактами, знос практично вже не залежить від подальшого зростання напруженості магнітного поля.

Залежність зносу від напруги. За відсутності зовнішнього магнітного поля, а також електродинамічних сил самого контуру струму (наприклад, при механічному розтяганні дуги торцевими контактами) знос контактів різко зростатиме із зростанням напруги (крива 2 на рис. 42, б), оскільки при більшій нарузі дуга буде триваліший час знаходитися на контактах.

При наявності зовнішнього магнітного поля гасіння дуга покидає щілину між контактами, ледве останні встигнуть розійтися на 1-2 мм, знос контактів практично не залежить від напруги мережі (крива 1).

Залежність зносу від величини струму. Знос контактів росте із зростанням струму. При незмінних інших умовах ця залежність близька до лінійної:

$$\sigma \sim I.$$

В апаратах, проте, зміна струму викликає і зміну зовнішнього магнітного поля (зокрема, при послідовній дугогасній котушці), тоді знос іде інтенсивніше за зростання струму:

$$\sigma \sim I^n,$$

де $n > 1$.

Залежність зносу від ширини контакту. При кожному відключенні розплавляється, випаровується і вигоряє певна кількість металу. Це головним чином метал з контактних площадок. Зміна кількості металу, що впливає на знос в області стикання, може бути досягнута за рахунок зміни ширини контактів. Досліди це підтверджують: знос контактів, вимірюваний зміною провалу, обернено пропорційний ширині контактів.

Залежність зносу від швидкості розходження контактів. У багатоамперних апаратах, де є магнітне дуття і в яких сам контур струму створює достатні електродинамічні сили, швидкість розходження контактів практично не позначається на величині зносу контактів. Збільшення швидкості розходження контактів не може бути способом боротьби із зносом. Тільки при дуже малих швидкостях розходження контактів знос збільшується із зменшенням швидкості їх розходження.

4.8 ЗНОС КОНТАКТІВ ПРИ ЗАМИКАННІ

Знос контактів має місце і при замиканні ланцюгів. При замиканні відбувається удар рухомого контакту об нерухомий, перекочування і прослизання контактів. Це приводить до розклепування і стирання контактних поверхонь, тобто до механічного їх зносу, що, як правило, відносно невеликий і не відіграє істотної ролі в роботі апарата.

При замиканні має також місце електричний знос, який у ряді випадків перевершує знос при розмиканні. Він викликається вібрацією контактів, що виникає при замиканні. Рухомий контакт підходить до нерухомого з певною швидкістю. При зіткненні відбувається пружна деформація матеріалу обох контактів. Пружна деформація приводить до відкиду рухомого контакту – він відскакує від нерухомого на деяку відстань, вимірювану сотими й десятими долями міліметра (іноді до 1 мм). Під дією контактної пружини відбувається повторне замикання контактів. Цей процес може повторюватися кілька разів із затухаючою амплітудою, як показано на рис. 43. При кожному відкиді між

контактами виникає електрична дуга, що викликає їх знос.

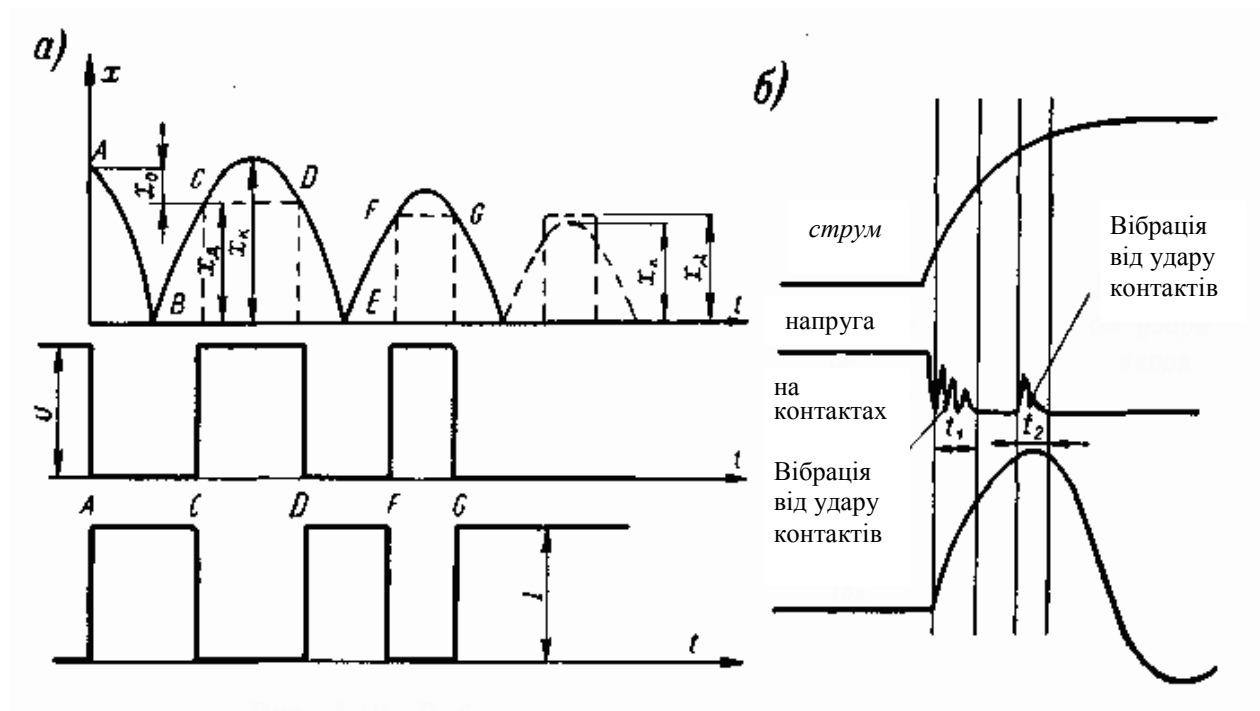


Рис. 43 – Вібрація контактів при замиканні

Вібрація при замиканні можлива унаслідок удару при притяганні якоря. При цьому знос може бути більшим, ніж від удару самих контактів, оскільки тут вібрація контактів відбувається при набагато більших миттєвих значеннях струму (рис. 43, б).

Нижче наводяться одержані дослідним шляхом залежності величини зносу контактів при замиканні від ряду чинників.

Залежність зносу від співвідношення механічної і тягової характеристик апарату. Швидкість руху контактів визначається співвідношенням між механічною (крива 1) і тяговою (криві 2, 3 і 4) характеристиками (рис. 44).

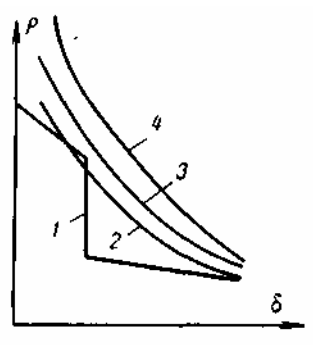


Рис. 44 – Тягові й механічні характеристики

Чим більший запас тягового зусилля (крива 4), тим більшою буде швидкість, а, отже, великими будуть удар і вібрація контактів. При недостатньому тяговому зусиллі (крива 2) відбуватиметься зупинка рухомої

системи в момент зіткнення контактів (двотактне включення), що також приведе до підвищення зносу. Для забезпечення мінімального зносу тягова характеристика повинна забезпечувати чітке включення апарату і не мати надмірних запасів (крива 3).

Залежність зносу від початкового натиснення P_n й жорсткості контактної пружини. Початкове натиснення на контакти в момент їх зіткнення – це та сила, яка протидіє відкиду контактів при їх зіткненні. Природно, що чим більша ця сила, тим менше будуть відкид і вібрація, а, отже, і знос (рис. 45,а). На рисунку показаний характер вібрації контактів при зниженому й підвищеному натисненнях. Крива U_k зображає напругу на контактах, крива I_k – струм через контакти.

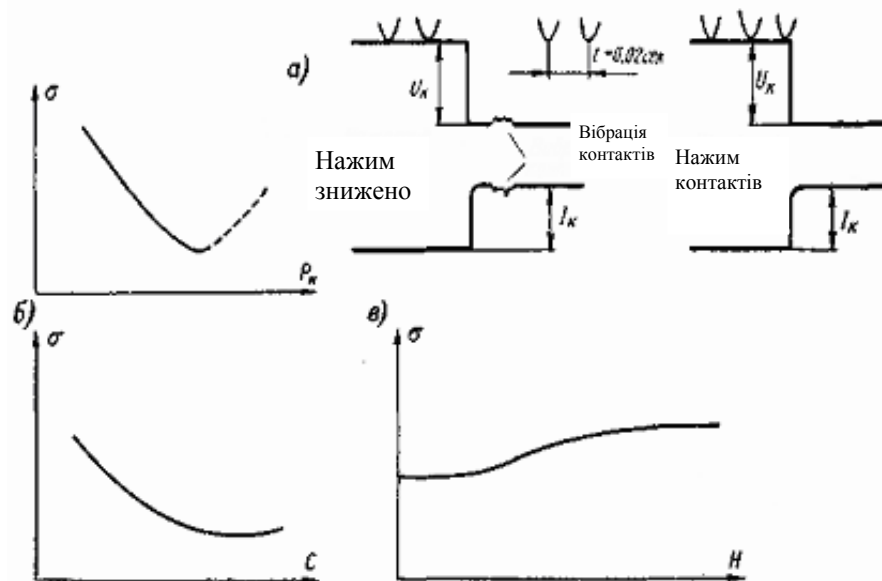


Рис. 45 – Залежність зносу контактів при замиканні:
а – від початкового натиснення; б – від жорсткості контактної пружини;
в – від напруженості магнітного поля.

Як видно з графіків, при пониженому натисненні контакти розмикалися кілька разів. При підвищеному натисненні розмикання не було.

Підвищення початкового натиснення обмежене тяговою характеристикою. Якщо початкове натиснення перевершує деяке значення, при якому М.Д.С. втягуючої котушки стає недостатньою для деформації тугої пружини і має місце відкид усієї рухомої системи, знос контактів починає зростати (штрихова частина кривої на рис. 45,а).

Залежність зносу від жорсткості контактної пружини характеризується кривою на рис. 45,б. При більшій жорсткості відкид контактів буде дещо меншим, а отже, знос дещо знизиться.

Залежність зносу від напруженості магнітного поля (рис. 45, в). При кожному розмиканні між контактами утворюється місток з розплавленого металу. Магнітне поле прагне викинути його звідти. Таким чином, знос

зростає із зростанням напруженості. При деякому значенні напруженості викидатиметься весь розплавлений метал, і подальше збільшення напруженості вже не приводить до зростання зносу.

Залежність зносу від числа замикань і ширини контакту. Як і при розмиканні, знос контактів при замиканні пропорційний числу замикань і обернено пропорційний ширині контакту.

4.9. РОБОТА КОНТАКТНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

При коротких замиканнях виникають досить важкі умови роботи як для контактів, що не розмикаються, так і для комутуючих контактів.

У контактних з'єднаннях, що не розмикаються, слабким місцем є болтове з'єднання. Болт, що стягує деталі, практично не проводить струму, і внаслідок короткочасності процесу короткого замикання можна вважати, що температура болта не змінюється. Теплове розширення струмоведучих деталей викличе додаткову напругу, яка, з'єднуючись з напругою затягування болта, може призвести до залишкових деформацій і ослаблення контактного з'єднання після його охолодження. Тому контактні з'єднання, що не розмикаються, треба перевірятися на додаткові механічні напруги, що виникають в болтовому з'єднанні при короткому замиканні.

Для контактів, що розмикаються, характерні: а) момент замикання; б) замкнуте положення; у) момент розмикання.

При коротких замиканнях виникає небезпека зварювання контактів при знаходженні їх у замкнутому положенні (при наскрізному струмі короткого замикання) і тим більше в момент замикання (включення на коротке замикання).

При короткому замиканні має місце не тільки різке збільшення струму, але і збільшення перехідного опору контакту через ослаблення контактного натиснення, що викликається електродинамічними силами. Теплова енергія, що виділяється в місці контакту і дорівнює

$$\int_0^{t_k} i^2 R_{\text{пер}} dt,$$

різко зростає і може викликати розплавлення і зварювання контактів. На практиці внаслідок короткочасності коротких замикань таке явище спостерігається рідко. Зварювання замкнутих контактів відбувається, як правило, за рахунок електродинамічного відкиду, коли електродинамічні сили дорівнюють контактному натисненню або перевершують його. Виникаюча при відкиді контактів дуга викликає значне оплавлення робочих поверхонь і їх зварювання при замиканні.

Для визначення мінімального струму, при якому відбувається зварювання контактів, можна користуватися наступною дослідною формулою (за даними Г.В. Буткевича [1]):

$$I \leq K (10 P)^{1/2},$$

де I – допустима амплітуда ударного струму, а;

P – контактне натиснення, н;

K – коефіцієнт, що залежить від матеріалу контактів і числа точок стикання.

Значення коефіцієнта K наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Тип контакту	Матеріал	$K, \text{а/Н}^{0,5}$
Пакетно-пластинчатий	Мідь – латунь	300 – 400
Важільний (ламельний)	Мідь – мідь	410
Який не сам установлюється	Латунь – латунь	505
Важільний (ламельний)	Мідь – латунь	575
Який сам установлюється	Мідь – латунь	550
Розеточний (на один елемент розетки)	Мідь – мідь	600

При включенні на коротке замикання вірогідність зварювання контактів зростає як за рахунок можливої вібрації, так і меншого натиснення (у момент зіткнення контактне натиснення рівне початковому P_n).

При відключенні струмів короткого замикання має місце сильне вигорання і оплавлення контактів. Зниження зносу дугогасних контактів досягається застосуванням дугостійких матеріалів і швидким переміщенням дуги по контактах.

4.10 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СИЛИ В КОНТАКТАХ І СПОСОБИ ЇХ КОМПЕНСАЦІЇ

Контакт (рис.46, а) може бути представлений як провідник змінного перерізу. У місці звуження ліній струму виникають подовжні електродинамічні сили, що прагнуть розімкнути контакти. Для одноточкових контактів величина цих сил визначається виразом

$$F_1 = 10^{-7} i^2 \ln \frac{s}{s_0},$$

для багатоточкових

$$F_1 = 10^{-7} \frac{i^2}{n} \ln \frac{s}{s_0},$$

де s – переріз контакту в тому місці, де немає викривлення ліній струму;

s_0 – дійсна площа контактування;

n – кількість місць контактування.

В апаратах на великі струми, зокрема в автоматичних вимикачах,

прагнуть так виконати контактну систему, щоб компенсувати або ослабити дію електродинамічних сил. Наприклад, у містковій системі на рис. 46, б, електродинамічна сила F_2 контуру abed, що діє на містковий контакт і дорівнює

$$F_2 = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \cdot \left(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$$

$$b = \frac{a}{r}, \quad c = \frac{a}{h}.$$

направлена назустріч електродинамічним силам F_1 в перехідних контактах. Можна підібрати розміри h і a таким чином, щоб $F_2 > 2F_1$. У контактній системі рис. 46, в електродинамічна сила F_2 відсутня, а в системі на рис. 46, г сила F_z складається з силами F_1 . З погляду електродинамічної стійкості остання система є найменш стійкою.

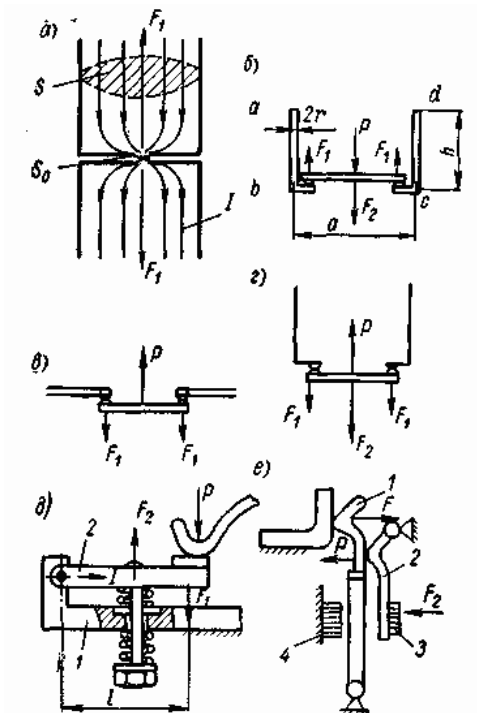


Рис. 46 – Приклади наповнення електродинамічної і електромагнітної компенсації електродинамічних сил:

P – контактне натиснення; F_1 – відкидаючі сили; F_2 – компенсуючі сили

На рис. 46, д показаний приклад електродинамічної компенсації для контактів, важелів. Нерухомий контакт складається з двох частин (1 і 2), сполучених за допомогою шарніра. Рухома частина цього контакту утримується в нейтральному положенні двома пружинами, що діють назустріч одна одній. Електродинамічна сила F_z прагне розсунути паралельні частини 1 і 2 контакту. Сила F_z направлена назустріч силі F_1 . Можна підібрати довжину петлі 1 такою, щоб $F_z l_z > F_1 l_1$. Тоді при короткому замиканні контакт 2

завжди притискатиметься до рухомого контакту і контактне натиснення при цьому зростатиме.

Схема електромагнітного компенсатора наведена на рис. 46, е. Магнітне поле навколо струмопроводу рухомого контакту прагне притягати якір 3 магнітопроводу компенсатора до його нерухомої частини 4, Через важіль 2 сила F_Z передається на рухомий контакт 1, перешкоджаючи його відкиду, що викликається електродинамічною силою F_1 .

4.11 МАТЕРІАЛИ ДЛЯ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

Від матеріалу контакту значно залежать термін його служби і надійність роботи. До цих матеріалів ставляться такі вимоги: вони повинні мати високу електропровідність і теплопровідність, бути стійкими проти корозії і мати струмопровідну окисну плівку, бути дугостійкими, тобто мати високу температуру плавлення і випаровування, бути твердими, механічно міцними й легко піддаватися механічній обробці, мати невисоку вартість. Перераховані вимоги суперечливі, майже неможливо знайти матеріал, який задовольняв би всім цим їм.

Для контактних з'єднань застосовуються наступні матеріали.

Мідь, що задовольняє майже всім перерахованим вище вимогам, за винятком корозієстійкості. Оксиди міді мають низьку провідність. Мідь – найпоширеніший контактний матеріал, використовується як для контактів, що не розмикаються, так і для комутуючих контактів. У з'єднаннях, що не розмикаються, застосовують антикорозійні покриття робочих поверхонь .

У комутуючих контактах мідь застосовують при натисненнях більше 3н для всіх режимів роботи, окрім тривалого. Для тривалого режиму мідь не рекомендується, але якщо вона застосована, то слід вжити заходи боротьби з окисленням робочих поверхонь . Мідь може використовуватися і для дугогасних контактів при відключенні струмів до 30 000 а.

При малих контактних натисненнях ($P < 3\text{н}$) застосування мідних контактів не рекомендується.

Срібло – дуже гарний контактний матеріал, що задовольняє всім вимогам, за винятком дугостійкості при значних струмах. При малих струмах володіє хорошою зносостійкістю. Оксиди срібла мають майже таку ж провідність, як і чисте срібло. Срібло застосовують для головних контактів в апаратах на великі струми, для всіх контактів тривалого режиму роботи, в контактах на малі струми при малих натисненнях (контакти реле, контакти допоміжних ланцюгів). Срібло звичайно застосовують у вигляді накладок – усю деталь виконують з міді або іншого матеріалу, а на робочій поверхні контакту приварюють срібну накладку.

Алюміній, який порівняно з міддю володіє значно меншою електропровідністю і механічною міцністю. Утворює поганопровідну тверду окисну плівку, що істотно обмежує його застосування. У даний час рекомендується до широкого впровадження в контактних з'єднаннях, що не розмикаються (шинопроводи, монтажні дроти). Для цього контактні робочі

поверхні сріблять, міднять або армують міддю. Слід, проте, мати на увазі невисоку механічну міцність алюмінію, унаслідок чого з'єднання можуть з часом слабшати і контакт порушиться. Для комутуючих контактів не придатний.

Платина, золото, молібден. Застосовують для комутуючих контактів на дуже малі струми при малих натисненнях. Платина і золото не утворюють окисних плівок. Контакти з цих металів мають малий перехідний опір. Для підвищення зносостійкості застосовують сплави з платини з іридієм.

Вольфрам і сплави з вольфраму при великій твердості й високій температурі плавлення мають високу електричну зносостійкість. Вольфрам і сплави вольфрам - молібден, вольфрам - платина, вольфрам – платина - іридій та інші застосовують при малих струмах для контактів з великою частотою розмикання. При середніх і великих струмах їх використовуються як дугогасні контакти на струми, що відключаються, до 100 ка і більше.

Металокераміка – тісна механічна суміш двох металів, що практично не сплавляються, яка отримується методом спікання суміші їх порошків або просоченням одного розплавом іншого. При цьому один з металів має хорошу електропровідність, а інший має велику механічну міцність, є тугоплавким і дугостійким. Металокераміка, таким чином, поєднує високу дугостійкість з відносно хорошою електропровідністю. Найбільш поширеними композиціями металокераміки є: срібло – вольфрам, срібло – молібден, срібло – нікель, срібло – окисел кадмію, срібло – графіт, срібло – графіт – нікель, мідь – вольфрам, мідь – молібден та ін. Застосовується металокераміка як дугогасні контакти (композиції з сріблом в основному для змінного струму) на середні й великі струми, що відключаються, а також як головні контакти на номінальні струми до 600 а.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: Учебник для техникумов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 304с.
3. Электротехнический справочник: В 4-х т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства /Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 1998 – 518 с.
4. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Справочник. Электрические аппараты. – М.: РадиоСофт., 2003. – 251 с.
5. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения /Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М. Бортник и др.; Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с.
6. Залеский А.М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л., 1967. – 378 с.
7. Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. Задачник по электрическим аппаратам: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электрические аппараты». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.
8. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) «Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация»
9. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка: Навч. посібник. – К.: Каравела, 2006. – 376 с.

Навчальне видання

**Тимофєєв Євген Петрович,
Ляшенко Олена Миколаївна**

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Конспект лекцій

(для студентів денної і заочної форми навчання за напрямом підготовки
6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності
«Світлотехніка і джерела світла»)

Редактор *М. З. Аляб'єв*

План 2008, поз. 17 Л

Підп. до друку 27.05.2008 р.	Формат 60×84 1/16
Друк на ризографі.	Ум. друк. арк. 4,8
Зам. №	Тираж 100 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 731 від 19.12.2001